

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AERONÁUTICA**  
**PROYECTO FIN DE CARRERA**



# **SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL DE POTENCIA DE UN TÚNEL AERODINÁMICO**

**AIDA FERRO ARDANUY**  
**INGENIERÍA TÉCNICA AERONÁUTICA, ESPECIALIDAD EN AERONAVEGACIÓN**  
**JULIO 2012**

# **Sistema eléctrico y de control de potencia de un túnel aerodinámico**

Autora: Aida Ferro Ardanuy

Tutor: Santiago Pindado Carrión

Julio 2012, Madrid

**Título:** Sistema eléctrico y de control de potencia de un túnel aerodinámico

**Autor:** Aida Ferro Ardanuy

**Director:** Santiago Pindado Carrión

**Titulación:** Ingeniería Técnica Aeronáutica, especialidad en Aeronavegación

**Fecha:** Julio 2012

### **Resumen**

Este proyecto trata de diseñar el sistema eléctrico y de control de potencia de una maqueta del túnel aerodinámico ACLA-16 de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Dicha maqueta se utiliza para estudiar el efecto de la capa límite atmosférica, debido a su importancia en el impacto sobre estructuras civiles.

Primero se desarrolla una parte teórica sobre qué son los túneles aerodinámicos, las aplicaciones que tienen y conceptos básicos acerca de la capa límite atmosférica. Luego se analiza el diseño geométrico de la maqueta del túnel y se detallan los elementos que debe tener el sistema eléctrico. Además, se realiza una simulación por ordenador con un programa de CFD (Fluent) para comparar los resultados experimentales reales con los resultados numéricos de la simulación para comprobar si se pueden extraer resultados aceptables por ordenador y así ahorrar costes y tiempo en el estudio de ensayos.

**Title:** Electric and power control systems of a wind tunnel

**Author:** Aida Ferro Ardanuy

**Director:** Santiago Pindado Carrión

**Studies:** Thecnical Aeronautical Engineering, specialized in Air Navigation

**Date:** July 2012

### **Overview**

This project is about the design of the electrical system and power control of a wind tunnel model. The real tunnel is called ACLA-16, and belongs to the Universidad Politécnica de Madrid (UPM). The model is used to study the effects of the atmospheric boundary layer (ABL), because of its importance in the impact on civil structures.

First, it is developed a theoretical part about what the wind tunnels are, which its purposes are and the basic concepts of ABL. Then, the geometric design of the model is analyzed and the electric components are detailed. Also, a simulation using a computational fluid dynamics program (CFD), Fluent, is done to compare the experimental results with the numerical results. It is done in order to check if it is possible to get the results from the computer, instead of the model, to save costs and time in the studies.

Primero, quiero dar las gracias a mi familia por los ánimos que me han dado a lo largo de la carrera, sobretodo éste último año estando lejos de casa.

Agradecer a los amigos de facultad, de hacer que estos tres años sean inolvidables, por todos los momentos vividos en la biblioteca, en la cafetería y fuera del campus.

Gracias también, a los amigos de Barcelona y a todos los que he hecho aquí en Madrid por darme su apoyo y estar a mi lado.

Para terminar, muchas gracias al personal docente de ambas universidades por abrirme las puertas al conocimiento y motivarme a seguir estudiando. Agradecer a

Fernando Gallardo la ayuda prestada, y sobretodo al tutor de éste proyecto, Santiago Pindado, por las horas, la dedicación y la orientación recibida a lo largo de estos meses.

*Per començar, vull donar les gràcies a la meva família pels ànims que m'han donat al llarg de la carrera, sobretot aquest últim any estant lluny de casa.*

*Agrair als amics de facultat, de fer que aquests tres anys siguin inolvidables, per tots els moments viscuts a la biblioteca, a la cafeteria i a fora del campus. Gracies també, als amics de Barcelona i a tots els que he fet aquí a Madrid per donar-me suport i estar al meu costat.*

*Finalment, moltes gràcies al personal docent d'ambdues universitats per obrir-me les portes al coneixement i motivar-me a seguir estudiant. Agrair a Fernando Gallardo l'ajuda prestada, i sobretot al tutor d'aquest projecte, Santiago Pindado, per les hores, la dedicació i l'orientació rebuda al llarg d'aquets mesos.*

Aida Ferro Ardanuy

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
1.1 Historia .....	12
1.2 Túneles aerodinámicos .....	14
1.2.1 Partes generales .....	14
1.2.2 Tipos.....	16
1.3 Principios de semejanza.....	23
1.3.1 Fuerzas que actúan sobre un fluido .....	25
1.3.2 Parámetros adimensionales .....	26
1.4 Túnel aerodinámico ACLA-16.....	27
1.5 Túneles semejantes .....	29
<b>2. CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>33</b>
2.1 Definición de capa límite atmosférica .....	33
2.2 Estructura de la capa límite atmosférica .....	35
2.3 Características de la capa límite atmosférica .....	36
2.3.1 Viento medio .....	37
2.3.2 Turbulencia .....	38
<b>3. DISEÑO GEOMÉTRICO .....</b>	<b>42</b>
3.1 Datos característicos del túnel .....	43
3.2 Elementos para la simulación de la capa límite.....	44
<b>4. PLANTA MOTRIZ .....</b>	<b>49</b>
4.1 Definición .....	49
4.2 Requisitos.....	50
4.3 Tipos de ventiladores.....	51
4.4 Características planta motriz .....	53
4.5 Instalación eléctrica .....	56
4.5.1 Requisitos .....	56
4.5.2 Elementos básicos .....	56
4.5.3 Esquema eléctrico .....	58
4.5.4 Elección componentes del mercado .....	59

<b>5. FABRICACIÓN .....</b>	<b>61</b>
5.1 Materiales .....	61
5.2 Proceso de fabricación.....	61
5.2.1 Túnel aerodinámico .....	61
5.2.2 Simulaciones de capa limite .....	62
<b>6. INSTRUMENTACIÓN.....</b>	<b>64</b>
<b>7. ANÁLISIS DE COSTES .....</b>	<b>69</b>
<b>8. ESTUDIO DEL FLUJO EN LA CÁMARA DE ENSAYOS.....</b>	<b>73</b>
8.1 Configuración 1: Sin nada .....	74
8.2 Configuración 2: <b>R1</b> .....	78
8.3 Configuración 3: <b>R2</b> .....	81
8.4 Configuración 4: <b>R3</b> .....	83
8.5 Configuración 5: <b>R4</b> .....	85
8.6 Configuración 6: <b>T1</b> .....	87
8.7 Configuración 7: <b>T2</b> .....	91
8.8 Configuración 8: <b>T3</b> .....	94
8.9 Configuración 9: <b>T4</b> .....	96
8.10 Configuración 10: <b>R1 T3</b> .....	98
8.11 Configuración 11: <b>R2 T3</b> .....	101
8.12 Configuración 12: <b>R3 T4</b> .....	104
8.13 Configuración 13: <b>R4 T4</b> .....	107
8.14 Conclusiones .....	110
<b>9. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>113</b>
<b>10. REFERENCIAS.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO 1. ANÁLISIS NUMÉRICO .....</b>	<b>119</b>
Preproceso: Gambit .....	120
Simulación y postproceso: Fluent .....	122
<b>ANEXO 2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA .....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO 3. FICHAS TÉCNICAS .....</b>	<b>128</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Planeador construido por George Cayley en 1852 .....	12
Figura 2. Túnel aerodinámico simple construido por los hermanos Wright.....	13
Figura 3. Esquema de un túnel aerodinámico cerrado .....	15
Figura 4. Esquema de túnel aerodinámico de circuito cerrado .....	17
Figura 5. Túnel aerodinámico de circuito cerrado de Ferrari en Italia.....	18
Figura 6. Esquema de un túnel de aerodinámico de circuito abierto .....	19
Figura 7. Túnel aerodinámico de circuito abierto (Universidad de New Hampshire).....	19
Figura 8. Túnel aerodinámico a escala real con cámara de ensayos abierta (Langley Research Center - NASA).....	20
Figura 9. Arriba túnel de soplado. Abajo túnel de aspirado.....	20
Figura 10. Semejanza geométrica no detallada .....	24
Figura 11. Esquema de la planta y alzado del túnel aerodinámico de simulación de capa limite ACLA 16 .....	28
Figura 12. Interior de la cámara de ensayos con los generadores de turbulencia, la rugosidad superficial y la zona de medida (de atrás hacia adelante) .....	28
Figura 13. Capa límite atmosférica.....	34
Figura 14. Capa límite laminar y turbulenta.....	34
Figura 15. Estructura vertical de la capa límite atmosférica .....	35
Figura 16. Esquema representativo del túnel con las agujas ( <i>spires</i> ) y los bloques ( <i>floor roughness</i> ) .....	42
Figura 17. Esquema del túnel aerodinámico.....	43
Figura 18. Rugosidad 1 .....	44
Figura 19. Rugosidad 2 .....	45
Figura 20. Rugosidad 3 .....	45
Figura 21. Rugosidad 4 .....	46
Figura 22. Esquema triángulo tipo Irwin .....	47
Figura 23. Representación esquemática de la posición de las agujas .....	47
Figura 24. Partes de la planta motriz tipo DHAD 450 – 4.....	54
Figura 25. Dos turbina con diez álabes curvados hacia atras.....	55
Figura 26. Esquema del sistema eléctrico del túnel.....	58
Figura 27. Sección transversal túnel .....	62
Figura 28. Anemómetro de hilo caliente.....	66
Figura 29. Circuito de anemómetro de hilo caliente con el puente de Wheatstone.....	66
Figura 30. Anemómetro PCE-009 .....	67
Figura 31. Grafico comparación de costes .....	71
Figura 32. Configuración 1: Capas límites .....	74
Figura 33. Configuración 1: Planos horizontales.....	75
Figura 34. Configuración 1: Secciones transversales .....	76
Figura 35. Configuración 1: Comparación de resultados .....	77
Figura 36. Configuración 2: Capas límites .....	79
Figura 37. Configuración 2: Planos horizontales.....	79
Figura 38. Configuración 2: Secciones transversales .....	80



Figura 39. Configuración 3: Capas límites .....	81
Figura 40. Configuración 3: Planos horizontales .....	82
Figura 41. Configuración 3: Planos transversales .....	82
Figura 42. Configuración 4: Capas límites .....	83
Figura 43. Configuración 4: Planos horizontales .....	84
Figura 44. Configuración 4: Secciones transversales .....	84
Figura 45. Configuración 5: Capas límites .....	85
Figura 46. Configuración 5: Planos horizontales .....	86
Figura 47. Configuración 5: Secciones transversales .....	86
Figura 48. Configuración 6: Capas límites .....	87
Figura 49. Configuración 6: Planos horizontales .....	88
Figura 50. Configuración 6: Planos transversales .....	89
Figura 51. Configuración 6: comparación de resultados .....	90
Figura 52. Configuración 7: Capas límites .....	91
Figura 53. Configuración 7: Planos horizontales .....	92
Figura 54. Configuración 7: Secciones transversales .....	92
Figura 55. Configuración 7: Comparación de resultados .....	93
Figura 56. Configuración 8: Capas límites .....	94
Figura 57. Configuración 8: Planos horizontales .....	95
Figura 58. Configuración 8: Secciones transversales .....	95
Figura 59. Configuración 9: Capas límites .....	96
Figura 60. Configuración 9: Planos horizontales .....	97
Figura 61. Configuración 9: Secciones transversales .....	97
Figura 62. Configuración 10: Capas límites .....	98
Figura 63. Configuración 10: Planos horizontales .....	99
Figura 64. Configuración 10: Secciones transversales .....	99
Figura 65. Configuración 10: Comparación de resultados .....	100
Figura 66. Configuración 11: Capas límites .....	101
Figura 67. Configuración 11: Planos horizontales .....	102
Figura 68. Configuración 11: Secciones transversales .....	102
Figura 69. Configuración 11: Comparación de resultados .....	103
Figura 70. Configuración 12: Capas límites .....	104
Figura 71. Configuración 12: Planos horizontales .....	105
Figura 72. Configuración 12: Planos transversales .....	105
Figura 73. Configuración 12: Comparación resultados .....	106
Figura 74. Configuración 13: Capas límites .....	107
Figura 75. Configuración 13: Planos horizontales .....	108
Figura 76. Configuración 13: Secciones transversales .....	108
Figura 77. Configuración 13: Comparación de resultados .....	109
Figura 78. Gambit: aristas, superficies y volúmenes .....	120
Figura 79. Vista XZ de la malla utilizada .....	121

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Resumen del tipo de túneles aerodinámicos según distintos criterios.....	16
Tabla 2. Resumen del tipo de túneles aerodinámicos según la velocidad del flujo en su interior .....	21
Tabla 3. Clasificación de tipos de terreno por su categoría y el coeficiente de rugosidad de cada uno .....	37
Tabla 4. Valores de rugosidad aerodinámica para la caracterización del perfil de velocidades de modelo logarítmico .....	38
Tabla 5. Características de la rugosidad a pequeña escala simulada.....	44
Tabla 6. Características las agujas según el tipo de terreno simulado.....	47
Tabla 7. Tipos de ventiladores axiales.....	52
Tabla 8. Tipos de ventiladores centrífugos .....	53
Tabla 9. Información técnica del DHAD 450 - 4 .....	55
Tabla 10. Modelos y precios de los elementos eléctricos del circuito.....	59
Tabla 11. Precios de fabricación.....	69
Tabla 12. Precios planta potencia .....	70
Tabla 13. Costes totales .....	71
Tabla 14. Categoría de terreno y rugosidad que se estudia en cada configuración.....	73
Tabla 15. Configuración 1: Comparación de alpha .....	78
Tabla 16. Configuración 6: Comparación de alpha .....	90
Tabla 17. Configuración 7: Comparación de alpha .....	93
Tabla 18. Configuración 10: Comparación de alpha .....	100
Tabla 19. Configuración 11: Comparación de alpha .....	103
Tabla 20. Configuración 12: Comparación de alpha .....	106
Tabla 21. Configuración 13: Comparación de aplha .....	109
Tabla 22. Resultados de todas las comparaciones de alpha .....	110
Tabla 23. Factor de corrección de $\lambda$ .....	126
Tabla 24. Datos necesarios para el cálculo de pérdidas de carga.....	127
Tabla 25. Resultados de pérdida de carga .....	127

**1**

# **INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Historia

Desde principios de los tiempos, la humanidad ha observado fascinada como las aves surcan los cielos y se ha preguntado, ¿algún día, nosotros también podremos volar? Así es como, a lo largo de la historia, muchos han intentado inventar, diseñar y fabricar algún instrumento que llevara a cabo el sueño de todos.

En el siglo XV, el erudito Leonardo da Vinci (1452 – 1519) realizó diversos estudios sobre el vuelo y dibujó esquemas de máquinas voladoras, pero uno de los problemas que tenía, es que para averiguar si sus estudios funcionaban había que probarlos. Por ello, alguien se lanzaba desde arriba de una casa y el resultado menos dramático eran unos cuantos huesos rotos. Se siguió investigando como realizar una máquina capaz de volar y no fue hasta el siglo XVIII que el ser humano experimentó con los globos aerostáticos y en el siglo siguiente con los dirigibles. Los años siguientes se investigó con planeadores y finalmente en el siglo XIX, concretamente el año 1903, los hermanos Wright consiguieron realizar un vuelo en un avión controlado.

Mientras se desarrollaba el campo de la aviación, también se desarrollaba el campo de la aerodinámica, es decir, el estudio de los efectos del flujo de aire. Así es como en el siglo XVIII, Benjamin Robins (1707 – 1751), científico newtoniano e ingeniero militar inglés, se inventó un brazo giratorio para realizar experimentos de resistencia del aire en proyectiles y otros objetos. Más tarde en el mismo siglo, George Cayley (1773 – 1857), conocido como el padre de la aeronáutica, también utilizó un brazo giratorio para ver como afectaba la resistencia y la sustentación en distintos tipos de álabes. Además, descubrió e identificó las cuatro fuerzas aerodinámicas que afectan a una aeronave:

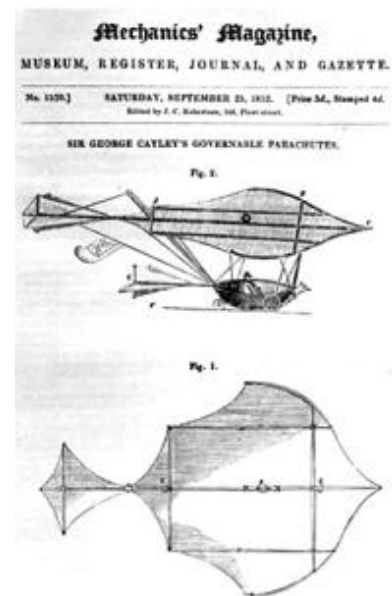


Figura 1. Planeador construido por George Cayley en 1852

sustentación, peso, empuje y resistencia. Gracias a los resultados obtenidos en sus experimentos, construyó un pequeño planeador que realizó un vuelo con éxito (ver *Figura 1*). Pero, a pesar del éxito, el invento del brazo giratorio tenía tres problemas principales: primero el efecto de las fuerzas centrífugas que afectaban al objeto de estudio, segundo el hecho de que el objeto se desplazase por flujo de aire perturbado que él mismo producía, es decir, por su estela, y finalmente la difícil instalación de los instrumentos de medición, y a su vez la obtención de resultados, cuando el brazo giratorio alcanzaba velocidades altas. [1]

Para arreglar los problemas del brazo giratorio, Francis Herbert Wenham (1824 – 1908) diseñó y construyó, en 1871, el que se considera el primer túnel aerodinámico de la historia, el precursor de los túneles actuales. Además, los hermanos Wright utilizaron un túnel aerodinámico simple para estudiar los efectos del flujo de aire en la aeronave que estaban realizando (ver *Figura 2*), y así tener más datos que respaldasen el buen funcionamiento del invento, es decir, estar más seguros, no como Leonardo da Vinci que tenía que probar sus inventos con el único respaldo de sus matemáticas [2].

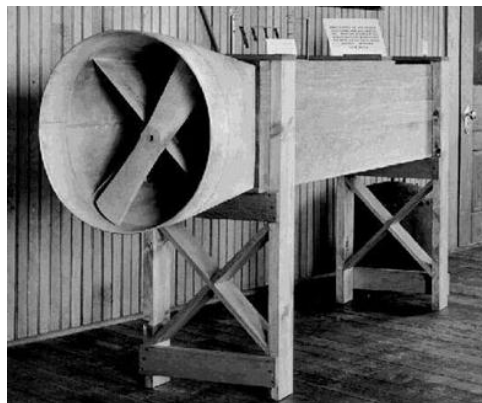


Figura 2. Túnel aerodinámico simple construido por los hermanos Wright

A partir de entonces se siguió investigando para optimizar tanto los túneles aerodinámicos (coste, dimensiones, exactitud de los resultados), como las capacidades y características de las aeronaves (autonomía, velocidad, alcance, materiales, maniobrabilidad).

Hoy en día, es imprescindible que una aeronave realice ensayos aerodinámicos tanto de las alas como del fuselaje para obtener la certificación de dicha aeronave, pero además la utilización de los túneles aerodinámicos se está normalizando en otros campos de la ingeniería como en la construcción de edificios, en el campo del automovilismo, en la náutica, en los deportes, etc., ya que proporciona resultados muy fiables.

## 1.2 Túneles aerodinámicos

---

Un túnel aerodinámico o túnel de viento es una herramienta de investigación científico-tecnológica que simula una situación real, generando un flujo con propiedades conocidas (velocidad, temperatura, turbulencia, viscosidad, etc.) para medir las acciones de la corriente sobre un objeto sólido, y que sirve para estudiar los fenómenos físicos del movimiento del aire alrededor de dicho objeto [3].

Normalmente se utiliza un modelo hecho a escala, y mientras este permanece estacionario, el aire o el fluido que se está estudiando pasa a su alrededor. De esta manera el modelo respecto al aire si que tiene velocidad relativa y obtenemos los mismos resultados que si estuviéramos estudiando el modelo en movimiento. Los resultados los obtenemos gracias a la instrumentación de medición que se encuentra en la cámara de ensayos para medir los datos requeridos.

### 1.2.1 Partes generales

Hay distintos tipos de túneles aerodinámicos, pero en esencia todos tienen los mismos componentes. A continuación vamos a ver las partes del túnel cerrado ya que tiene un componente más que el abierto:

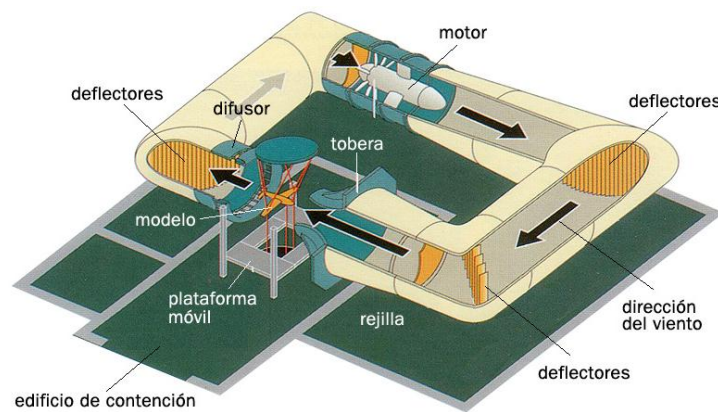


Figura 3. Esquema de un túnel aerodinámico cerrado

- **Planta motriz:** normalmente son uno o más ventiladores que funcionan gracias a un motor eléctrico y que se encargan de generar el movimiento del fluido a través de todo el túnel. Pueden situarse aguas arriba o aguas debajo de la cámara de ensayos. [4]
- **Estabilizadores de corriente:** son un conjunto de elementos que sirven para uniformizar el flujo. Pueden situarse delante o detrás de los ventiladores, en zonas dónde sea necesario para conseguir un flujo óptimo a lo largo del túnel. En general se utilizan rejillas y paneles de abeja, más conocidas por su nombre en inglés *honeycombs*. Las rejillas son unas mallas entretejidas de forma cuadrada o rectangular que se usan para anular, o como mínimo reducir, la turbulencia del flujo pero producen pérdidas de carga, por lo que normalmente las encontraremos en zonas de baja velocidad para minimizar dichas pérdidas. Por otro lado, las *honeycombs* son paneles de tubos de una longitud determinada y de forma circular, cuadrada o hexagonal, que se sitúan paralelamente a la dirección principal del flujo y se utilizan para eliminar la componente lateral de la velocidad que aparece cuando se empiezan a producir torbellinos, y así conseguir un perfil de velocidades de flujo paralelo y uniforme. Por ello, en los túneles aerodinámicos encontramos una combinación de estos dos elementos y se deben realizar diversos estudios para asegurarnos que la configuración, ya tanto geométrica de los elementos en si como la espacial entre ellas, sea óptima para conseguir el perfil de velocidades del fluido más uniforme posible. [5]

- Contracción: su finalidad es acelerar el fluido antes de que este entre en la cámara de ensayos, por lo que la sección de entrada es mayor que la sección de salida.
- Cámara de ensayos: es dónde se realizan los ensayos con los modelos, y dependiendo de su tamaño, los modelos podrán ser más grandes o no. Como ya se ha dicho antes, en la cámara de ensayos se instala el equipo de instrumentación necesario para conseguir los datos que queremos obtener del ensayo. Su geometría, si es una cámara de ensayos cerrada (ver 1.2.2), podrá tener la sección transversal rectangular o circular, mientras que su longitud será varias veces superior a la sección transversal. Se procurará que la accesibilidad para el montaje y desmontaje del modelo sea de fácil acceso.
- Difusor: su finalidad es reducir la velocidad del flujo una vez ha pasado por la cámara de ensayos, por lo que tiene una forma divergente, es decir, la sección de entrada de flujo es menor que la sección de salida.
- Conducto de retorno: sirve para conectar todo el túnel, uniendo el difusor con la contracción pasando por la planta motriz, posibilitando así la recirculación del fluido. Solamente se utiliza en túneles de viento de circuito cerrado.

### 1.2.2 Tipos

Se pueden clasificar según varios criterios, que están resumidos en la tabla siguiente (ver *Tabla 1*), y luego se describe detalladamente cada uno:

Criterio	Tipo de túnel aerodinámico			
Configuración geométrica	Abierto		Cerrado	
Cámara ensayos	Abierta		Cerrada	
Posición de la planta motriz	Delante cámara de ensayos		Detrás cámara de ensayos	
Velocidad del flujo	Subsónico	Transónico	Supersónico	Hipersónico
Aplicación	Aerodinámica aeronáutica		Aerodinámica civil	

Tabla 1. Resumen del tipo de túneles aerodinámicos según distintos criterios



- Configuración geométrica

Básicamente pueden ser túneles de circuito cerrado o abierto, según tengan o no un conducto de retorno, y utilizaremos uno u otro según la finalidad que tenga.

- Túnel de circuito cerrado: se caracterizan por tener un conducto de retorno, por lo que el fluido realiza un circuito cíclico, es decir, la salida del aire también es la entrada. Por ello, podemos controlar las variables termodinámicas, como la densidad, la temperatura y la presión del fluido independientemente de las condiciones atmosféricas, con lo cuál obtendremos resultados más precisos. Además otra ventaja que presenta utilizar esta configuración geométrica, es que produce menos ruido y menos gasto energético que los de circuito abierto ya que por una parte las paredes del túnel amortiguan la mayoría de las ondas sonoras y por otra parte aprovecha la energía que se le ha proporcionado al fluido.

Pero también tiene desventajas, y es que requiere de unas dimensiones de instalación más grandes que el abierto y esto hace aumentar el coste de fabricación. Por otro lado, si se usa para ensayos muy largos se tendrá que prever un mecanismo de refrigeración o de renovación del aire del circuito, y más aún si se utiliza el método de visualización con humo (como el aire es transparente se colorea con un aditivo sintético llamado propilenglicol, que hace visible el aire dándole un aspecto de humo). [6]

Este tipo de túnel se suele utilizar para instalaciones grandes y estudios de larga duración.

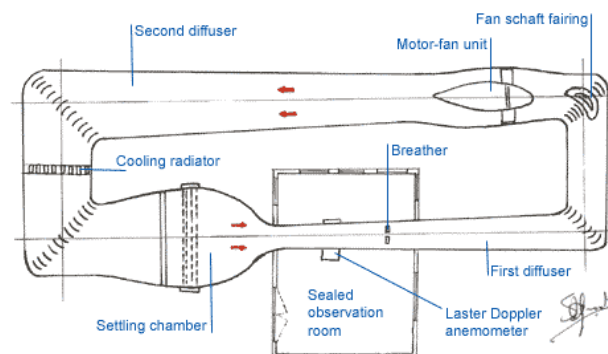


Figura 4. Esquema de túnel aerodinámico de circuito cerrado [7]



Figura 5. Túnel aerodinámico de circuito cerrado de Ferrari en Italia

- Túnel de circuito abierto: se caracterizan por no tener un circuito de retorno, es decir, se toma el aire de la atmósfera, pasa a través del túnel y se devuelve a ésta. Esto hace que las constantes termodinámicas del fluido se vean afectadas por las condiciones meteorológicas, sobretodo si se encuentra en el exterior, por lo que es aconsejable que este tipo de túnel se instale en el interior de un edificio, dónde estos parámetros podrán ser controlados más fácilmente en una sala habilitada para ello. El problema, es que dependiendo de las dimensiones de la sala se tienen que realizar estudios del flujo de aire en la entrada y la salida del túnel para asegurarnos de que no hay flujo de reentrada y por tanto, que el flujo en la cámara de ensayos es el correcto. Además, son más ruidosos que los túneles de circuito cerrado y tienen más gasto energético ya que la energía que absorbía el fluido en el circuito cerrado se reaprovechaba, y ahora se deposita toda en la atmosfera. Por el contrario, tiene ventajas tal y como un menor coste de fabricación ya que es más simple y se necesita menos tiempo, y que se pueden realizar ensayos mediante el uso de humo ya que continuamente se esta renovando.

Debido a su mejor funcionamiento en sitios cerrados, este tipo de túneles suelen utilizarse en pequeñas instalaciones y para la enseñanza.

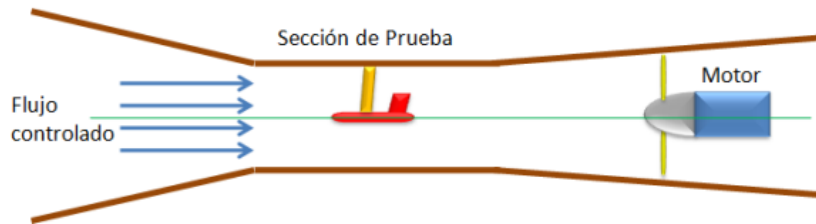


Figura 6. Esquema de un túnel de aerodinámico de circuito abierto



Figura 7. Túnel aerodinámico de circuito abierto (Universidad de New Hampshire)

- Cámara de ensayos
- Túnel de cámara de ensayos abierta: se caracteriza por tener alguno de sus límites o todos ellos en contacto con el exterior, por lo que se evita la distorsión de las líneas de corriente y se simula mejor el movimiento libre. La desventaja es que tenemos menos control sobre el flujo y las pérdidas son mayores que la sección de ensayos cerrada ya que el aire se escapa. Además, cuando se combina con un túnel de circuito cerrado suelen aparecer problemas de fluctuación de flujo que tendrán que ser estudiadas y corregidas. En cambio, si se combina con un túnel de circuito abierto se tendrá que tener mucho cuidado en el diseño de las entradas y salidas del aire de la sección. Normalmente la cámara de ensayos abierta se utiliza para ensayar con modelos de tamaño grande gracias a su mayor facilidad para manejarlos, y se utiliza una plataforma para alojar la instrumentación de medición evitando que interaccione con la corriente fluida.

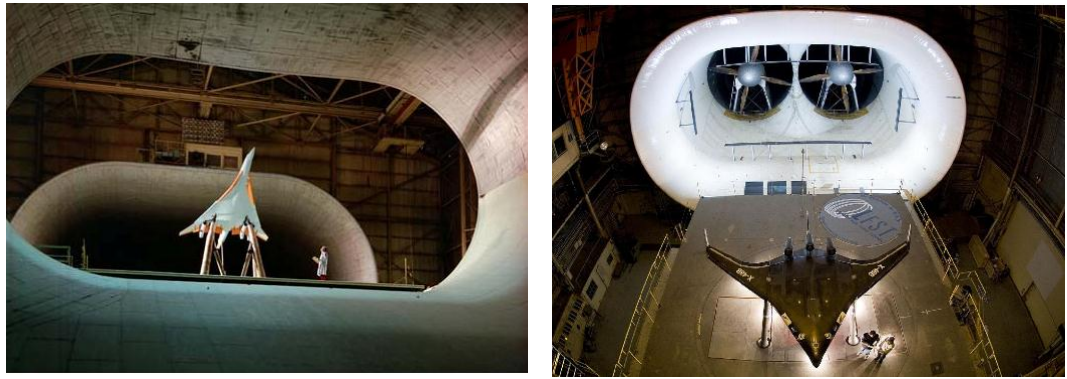


Figura 8. Túnel aerodinámico a escala real con cámara de ensayos abierta (Langley Research Center - NASA)

- Túnel de cámara de ensayos cerrada: se caracteriza por tener cuatro límites sólidos que aíslan el fluido del exterior durante el ensayo, haciendo que sea un fluido más estable, pero con mayores efectos debido a las paredes. La mayoría de túneles usan este tipo de cámara de ensayos, dándole una geometría rectangular para facilitar el cambio de modelo y su maniobrabilidad.
- Posición de la planta motriz
  - Soplado: la planta motriz se sitúa antes de la cámara de ensayos, y proporciona ventajas como mayor velocidad del flujo, pero es necesario introducir más elementos estabilizadores antes de llegar a la cámara ya que el flujo es menos uniforme porque los ventiladores introducen mayor turbulencia al flujo.
  - Aspirado: la planta motriz se sitúa después de la cámara de ensayos, y aunque proporcione menos velocidad al fluido, éste es más regular y uniforme, por lo que se tendrá que dar más potencia.

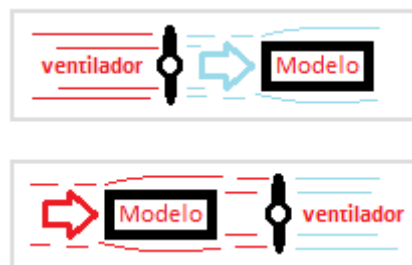


Figura 9. Arriba túnel de soplado. Abajo túnel de aspirado

- Velocidad del flujo

Dependiendo de la velocidad del flujo que lo medimos con el número de Mach, el túnel tendrá una geometría u otra. En la siguiente tabla (ver *Tabla 2*) podemos ver un resumen de los cuatro tipos de túneles con información acerca de sus características: en que intervalos de Mach se usa cada uno, cómo suele ser el flujo a estas velocidades, cómo debe ser el diseño del motor, la forma óptima que debe tener la sección de entrada y el ratio de compresión de ésta.

Se escogerá un túnel u otro dependiendo de lo que se quiere estudiar, es decir, dependiendo del régimen al que esté sometido el objeto en la situación real.






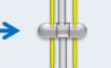
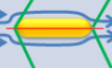
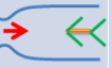
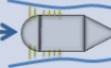



Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Ratio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico ( $M = 0 - 0.7$ )			1.0+	
Transónico ( $M = 0.7 - 1.2$ )			1.1	
Supersónico ( $M = 1.2 - 5$ )			2 ( $M = 2$ )	
Hipersónico ( $M > 5$ )			20 ( $M = 5$ )	

Tabla 2. Resumen del tipo de túneles aerodinámicos según la velocidad del flujo en su interior

- Aplicaciones

Hasta ahora las clasificaciones iban más enfocadas hacia el aspecto geométrico o las propiedades del flujo que pasa a través del túnel, pero una clasificación muy importante es dependiente del uso que le queremos dar. Pero actualmente, el túnel aerodinámico se utiliza en distintos campos de la ingeniería para estudiar diversos fenómenos, y hasta se utilizan diferentes fluidos. Realizar una clasificación según su aplicación es muy extensa, ya que su uso se ha generalizado bastante.

Aunque la mayoría de túneles aerodinámicos son horizontales también existen los túneles verticales. Suelen utilizarse para estudiar los casos en que un avión entra en pérdida, para realizar ensayos sobre el V/STOL (despegue vertical) o estudiar la caída libre de un paracaidista.

Respecto a los túneles horizontales, podemos encontrarlos que utilizan distintos fluidos, como el aire, el aire combinado con el humo para visualizarlo (túnel de humo), el hielo para hacer ensayos sobre superficies sustentadoras y ver como afecta la escarcha (túnel de hielo) o que el fluido emparado sea el agua (túnel de agua).

En otros campos de ingeniería encontramos túneles diseñados para ensayos automovilísticos, ya sea de fórmula 1, de coches para uso particular o de grandes dimensiones, para mejorar la aerodinámica y poder reducir combustible o basarse en estudiar la resistencia a climas adversos como el viento, el hielo o el agua. Del mismo modo también hay túneles que ensayan con motores. En el ámbito medioambiental se utilizan para ensayar y prever efectos meteorológicos, ver la distribución del flujo en una topografía determinada o estudiar la atmósfera.

Otro campo ingenieril muy importante es el de la construcción. En referencia a la construcción de puentes es sumamente importante que se haga un estudio para comprobar que es suficientemente elástico y rígido para aguantar el viento de la zona. En referencia a la construcción de edificios, es sumamente importante realizar los ensayos ya que en los nuevos diseños tienden a ser más altos para albergar la población creciente, y por tanto tienen más superficie expuesta al viento. Por ello, algunos de los estudios realizados tratan de comprobar si los edificios son suficientemente elásticos, qué resistencia muestran a las ráfagas, qué cargas estructurales y frecuencias de vibraciones tienen que soportar, etc.

Finalmente, hay túneles para deportistas, es decir, que los deportistas entrenan en el túnel para encontrar la posición que oponga menor resistencia al aire para así ir más rápidos en la competición. Suelen utilizarla deportistas que practican, esquí, natación, ciclismo, etc.

- Objeto de estudio
- Túnel aerodinámico aeronáutico: donde el modelo que se estudia tiene una geometría fuselada y están pensados para perturbar la corriente lo más mínimo. El objetivo de estos objetos, y por tanto su diseño y lo que se ensaya en el túnel, es que al capa limite permanezca adherida a él, evitando o retrasando en la medida de lo posible su desprendimiento.
- Túnel aerodinámico no aeronáutico o civil: son aquellos que estudian los modelos no fuselados, es decir, con aristas y/o formas bruscas. Lo que se busca en estos ensayos depende del modelo introducido ya que será para una aplicación o para otra, y como hemos visto anteriormente podríamos estar ensayando cómo afectara el viento a la estructura de un edificio, cómo reducir la resistencia aerodinámica de coches, deportistas y barcos, o simplemente no tener un objeto modelo, y estar observando cómo se desarrolla el viento en una topografía determinada.

### 1.3 Principios de semejanza

---

Como ya hemos dicho, el túnel aerodinámico estudia los fenómenos físicos que sufre un flujo al encontrarse con un obstáculo y los efectos que tiene sobre él. Dicho obstáculo, es un modelo del objeto real, un prototipo hecho a escala ya que normalmente no cabe, o no se puede meter dentro de la cámara de ensayo. Para que los resultados obtenidos del ensayo en el túnel sean realistas y concuerden con lo que pasará en la realidad, el objeto real y el modelo tienen que cumplir tres principios de semejanza. Si se cumplen, nos aseguraremos de que los resultados obtenidos representen lo que pasará en la realidad y así poder extraer conclusiones fiables. Las semejanzas tienen que ser geométricas, cinemáticas y dinámicas.

La semejanza geométrica trata de que el modelo de ensayos debe representar fielmente a escala aquellos detalles de la realidad que sean significativos aerodinámicamente. Tampoco es necesario de que sea una réplica exactamente igual ya que hay un momento, en que más detalles no mejoran los resultados y es complicar

la fabricación del modelo sin necesidad. Si nos fijamos en la *Figura 10*, vemos que se quiere estudiar la grada de un anfiteatro. La figura (a) representa con exactitud la geometría del lugar a estudiar, mientras la figura (b) se caracteriza como una superficie lisa. Podemos comprobar que el campo de fluido es prácticamente igual en ambos casos.

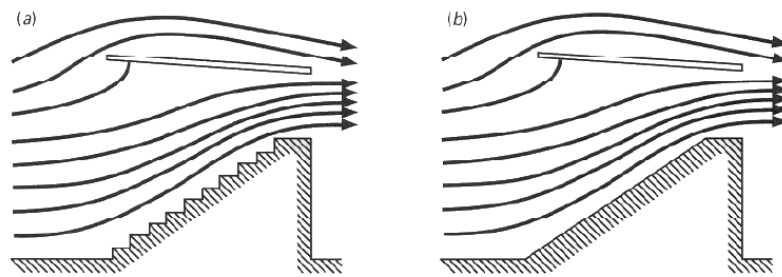


Figura 10. Semejanza geométrica no detallada [8]

La semejanza cinemática se refiere a que el flujo real y el simulado tienen que tener líneas de corriente y condiciones de corriente semejantes, de este modo los flujos simulados tendrán las mismas peculiaridades. Por ejemplo, si se quiere estudiar algún obstáculo de interés que se encuentra en la capa límite terrestre, tendremos que reproducirla de forma semejante con el perfil de velocidades medias y de turbulencia características de la capa. Señalar, que si hay semejanza cinemática, también tendremos semejanza geométrica ya que las líneas de corriente siguen los contornos que forman las superficies. [9]

La última semejanza a tener en cuenta, es la semejanza dinámica que implica que la distribución de fuerzas en los fluidos, sean paralelas y con relación de módulos constantes, para fuerzas del mismo tipo (presión, sustentación, rozamiento...) y en puntos homólogos del objeto real y del modelo a utilizar [10]. Para conseguir esta semejanza, será necesario que varios parámetros adimensionales (Euler, Jensen, Mach, Reynolds, Weber, etc.) sean iguales en ambos casos.



### 1.3.1 Fuerzas que actúan sobre un fluido

Como hemos dicho, la semejanza dinámica se consigue cuando las fuerzas de los fluidos cumplen una serie de requisitos y esto se cumple cuando los parámetros adimensionales son iguales, pero antes de analizarlos estudiaremos las fuerzas más importantes que actúan sobre el flujo, para luego obtener los parámetros necesarios.

- Fuerza de inercia ( $F_i$ ): también conocida como fuerza ficticia, es la que actúa sobre la masa de un cuerpo cuando éste está sometido a una aceleración. En nuestro caso el cuerpo es el aire y como la aceleración no es perfectamente uniforme para cada partícula de fluido, tomaremos un volumen cúbico determinado y aceptaremos que tiene aceleración constante. Tiene la siguiente expresión:

$$F_i = \rho \cdot l^2 \cdot v^2 \quad (1.1)$$

Siendo  $\rho$  la densidad del fluido,  $l$  dimensión del fluido y  $v$  velocidad del fluido.

- Fuerza gravitacional ( $F_g$ ): es la fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre el flujo. Tiene la siguiente expresión:

$$F_g = \rho \cdot l^3 \cdot g \quad (1.2)$$

Siendo  $g$  la aceleración de la gravedad terrestre.

- Fuerza viscosa ( $F_\mu$ ): es la fuerza de fricción entre las capas de un fluido. Tiene la siguiente expresión:

$$F_\mu = \mu \cdot l \cdot v \quad (1.3)$$

Siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido.

### 1.3.2 Parámetros adimensionales

Los parámetros adimensionales más importantes son el número de Mach y el número de Reynolds. Aparte de estos dos también encontramos otros parámetros pero de menor interés en fluidos gaseosos como el aire, como pueden ser el número de Froude, Euler, Jensen, Strouhal, Prandtl, Weber, Cauchy, etc.

- Número de Mach ( $M$ ): mide los efectos de la compresibilidad del aire y se expresa como el cociente entre velocidad del fluido que incide sobre el cuerpo y la velocidad del sonido, lejos del obstáculo. [

Cuando Mach es superior a uno, se trata de movimientos supersónicos, mientras que si es inferior a uno se trata de movimientos subsónicos. Además, para flujos incompresibles donde  $M < 0,3$ , este parámetro no es importante, en cambio para flujos compresibles es muy significativo.

$$M = \frac{v}{c} \quad (1.4)$$

Siendo  $c$  la velocidad del sonido.

- Número de Reynolds ( $R_e$ ): representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

Cuando el número de Reynolds es elevado nos encontramos en régimen turbulento ya que las fuerzas de inercia son mucho más significativas que las viscosas. A su vez, si el número de Reynolds es bajo se trata de un flujo laminar. Por ello si dos flujos tienen el mismo valor de este parámetro, serán flujos con el mismo grado de turbulencia y serán semejantes dinámicamente. El valor de inflexión entre ambos extremos es conocido como Reynolds crítico. [12]

$$R_e = \frac{\rho \cdot l \cdot v}{\mu} \quad (1.5)$$

Hay muchos parámetros adimensionales y la mayoría están relacionados entre sí, es decir, que si uno cambia otros parámetros también variarán. Además en el caso entre el número de Mach y el número de Reynolds, si queremos mantener el segundo, tendremos que mantener constante la velocidad por la longitud característica del

modelo. Si se hace, al ser la longitud característica del modelo más pequeña que la real, la velocidad aumentará, haciendo que el valor de Mach varíe y no sea igual al del objeto real. En esta circunstancia, tenemos que decidir en cuál de los dos parámetros conviene que nos fijemos. La elección dependerá del estudio que estemos realizando, ya que si se trata de un flujo supersónico el número de Mach es el que tiene mayor influencia sobre el fluido, en cambio si trabajamos con flujo subsónico será el número de Reynolds el que más influya en el fluido. En general, cuando suceden estos casos donde tenemos que escoger ceñirnos a uno u otro parámetro, la decisión se tomará en base a los conocimientos adquiridos en otros experimentos, y obviamente, según el objetivo del proyecto.

#### 1.4 Túnel aerodinámico ACLA-16

---

El túnel aerodinámico ACLA-16 es uno de los dos túneles con mayores dimensiones que posee el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM). Está situado en el edificio CIDA (Centro de Investigación y Desarrollo Aeroespacial) de la E.T.S.I. Aeronáuticos, en el Campus de Montegancedo.

El ACLA-16 es un túnel para medir modelos a escala, es decir que es un túnel de simulación de capa límite atmosférica ya que se miden las acciones del viento sobre el modelo para saber que pasa en el cuerpo real. En él se desarrollan proyectos de empresas, tanto nacionales como extranjeras, y proyectos de carácter universitario, es decir, estudios que quiere realizar el propio Instituto.

La instalación se realizó en el sótano del edificio citado, el cual tiene unas dimensiones de 40,1 metros de longitud, 7,7 metros de ancho y 7,3 metros de ancho.

El túnel se caracteriza por ser de cámara de ensayos cerrada, sin conducto de retorno específico ya que el aire retorna debido a la geometría específica del local donde se ubica. Consta de tres partes diferenciadas (ver *Figura 11*) la contracción (C), la cámara de ensayos (E), y el difusor (D). La zona representada con una (R) es el

circuito que recorre el flujo para volver a la sección de entrada, después de pasar por la sección de ventiladores (V) que están dispuestos en dos matrices de 2 x 4 a cada lado del túnel.

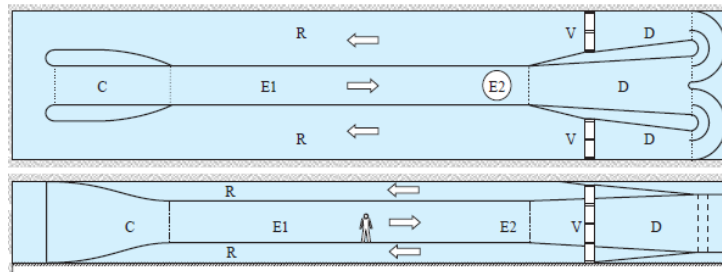


Figura 11. Esquema de la planta y alzado del túnel aerodinámico de simulación de capa límite ACLA 16

La cámara de ensayos (ver *Figura 12*) esta subdividida en la zona E1 que se caracteriza por ser donde se sitúan los elementos de generación de turbulencia y rugosidad superficial, mientras que la zona E2 es destinada para la medición del flujo. Toda la sección de la cámara de ensayos tiene una longitud de 20 metros, con una sección cuadrada de 2,2 x 2,2 metros. [13]



Figura 12. Interior de la cámara de ensayos con los generadores de turbulencia, la rugosidad superficial y la zona de medida (de atrás hacia adelante)

## 1.5 Túneles semejantes

---

Como hemos visto hay una gran diversidad de túneles aerodinámicos según los ensayos que se quieren realizar en él, diferenciados por su diseño geométrico (longitud, radio de contracción, etc.) o por los parámetros característicos de flujo (velocidad, presión, etc.) [14]

Y debido a esta gran diversificación, los túneles aerodinámicos están en auge. Ya abarca a más campos, es decir tiene más mercados que lo requieren, y no solo la ingeniería aeronáutica se beneficia de su uso, los demás campos también se aprovechan de esta nueva herramienta para hacer sus productos más atractivos para el cliente, más óptimos y ahorrando costes.

Por ejemplo, la industria automovilística de la fórmula 1 hace tiempo que diseña los coches en base a que ofrezcan poca resistencia al aire, y como ellos, muchas otras disciplinas deportivas como el ciclismo, el esquí y la natación, se han sumado a utilizar túneles aerodinámicos, ya que si un estudio te ofrece la posibilidad de ir más rápido es una ayuda más para poder llegar a la meta antes que los demás. Y de los coches de F1 a los coches de la calle ya que la mejora de la aerodinámica del producto es una mejora del rendimiento.

Y en el área de la construcción también está resultando ser muy importante ya que los diseños y nuevos materiales de fabricación tienen unas características distintas de los usados anteriormente; o bien tienen formas mas innovadoras y/o se utilizan materiales más ligeros. Por ello, las cargas del viento (estáticas y dinámicas) tienen más importancia que en el pasado, cuando normalmente eran despreciadas, y ahora son un factor clave de diseño.

Actualmente en España hay varios túneles aerodinámicos tanto pertenecientes a las universidades como a empresas privadas. Por ejemplo, INTA (Madrid) y Audi tienen su propio túnel aerodinámico, al igual que Epsilon Euskadi (Vitoria) tenía el suyo. Mientras que los dos últimos realizan sobre todo ensayos de tipo automovilístico para determinar la mejor aerodinámica de sus coches y probar en ellos todo tipo de

condiciones climáticas, el de INTA abarca tanto estudios civiles, como por ejemplo estudios en deportistas y de capa límite, como estudios de carácter más aeronáutico de obstáculos fuselados. La Universidad de Granada, de Málaga, de León, la UPM (Universidad Politécnica de Madrid) y la EETAC (Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels – Barcelona) también tienen sus propios túneles aerodinámicos. Los dos primeros son túneles aerodinámicos horizontales donde se realizan estudios de capa límite y de carácter aeronáutico, mientras el tercero es un túnel aerodinámico vertical. Aunque para túneles verticales también existe el construido la Base Aérea de Alcantarilla (Murcia) perteneciente a la Escuela Militar de Paracaidismo.

También hay varios proyectos para instalar túneles de viento como por ejemplo el proyecto del CiMET (Centro Integral de Mejora Energética y Medio Ambiental de Transporte – Valencia) que servirá para realizar todo tipo de estudios, incluido el de capa límite, pero por ahora está parado por falta de presupuesto. Otro proyecto en marcha es un túnel vertical para practicar caída libre en la escuela de paracaidismo de Empuriabrava (Girona) y que está previsto que se inaugure en octubre de este año.

Cómo hemos visto hay varios túneles aerodinámicos en España que se dedican, o pueden realizar, estudios de capa límite atmosférica, por ello vamos a ver para que sirven para:

- Analizar los movimientos del aire de la atmósfera según las características de rugosidad y el tipo de terreno en cuestión.
- Analizar la aerodinámica civil para proporcionar información sobre las particularidades del viento en las proximidades del obstáculo en consideración, obtener información sobre la distribución de presiones, sobre las cargas globales producidas por el viento en el obstáculo y, si la estructura es flexible y susceptible de experimentar fenómenos aeroelásticos, proporcionar los datos necesarios sobre efectos dinámicos inducidos por el viento. Además también servirá para estudiar la dispersión de la polución de aire.

Como vemos, en España, hay algunos proyectos en proceso para la construcción de túneles aerodinámicos de estudio de capa límite además de haber bastantes empresas

y universidades que ya lo utilizan. Debido a sus ventajas para ahorrar tiempo, costes, mejorar la calidad del producto y su eficiencia, que al fin y al cabo repercute en un aumento de beneficios para la empresa y una mayor satisfacción del cliente, podemos asegurar que su implementación esta asegurada. El problema es la gran inversión inicial requerida, y a causa de la crisis en la que esta sumergida España, no sería viable empezar ahora un proyecto de tales dimensiones. Como hemos comprobado, el túnel de viento de Valencia hace años que esta parado por falta de fondos. Así pues, podemos decir que en un futuro a largo plazo los túneles aerodinámicos tienen su sitio, ya que además de las ventajas descritas nos dan datos más precisos que las simulaciones con CFD, pero por ahora las empresas se tendrán que conformar con alquilar los túneles existentes hasta que la situación económica de la sociedad se normalice.

**2**

## **CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA**



## 2. CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

### 2.1 Definición de capa límite atmosférica

La capa límite atmosférica terrestre o capa límite planetaria es la parte de la troposfera influenciada directamente por la superficie irregular de la Tierra, en un espacio temporal de horas. El flujo se modifica debido a las fuerzas de fricción de arrastre de la superficie, a la transferencia de calor, a la emisión de contaminantes, a la evaporación, la transpiración, pero la más importante de todas son las características del terreno. Estos aspectos modifican propiedades del fluido, tal como la velocidad y la temperatura. [15]

Si miramos a la *Figura 13*, vemos que cuando el fluido está en contacto con la superficie terrestre la velocidad es cero  $v_0$ , ya que se considera que no hay deslizamiento. A medida que se aleja de la superficie la velocidad aumenta de forma exponencial hasta que llega un momento en que lo hace de forma asintótica, es decir, la velocidad es constante  $v_\infty$  (velocidad del flujo libre). Esto significa que el flujo deja de notar la influencia de la superficie.

Además, también se ve representada una línea continua azul, que representa los puntos donde la velocidad del flujo es  $v = v_\infty \cdot 0.99$ . Es la línea que separa la zona con el flujo turbulento perturbado por la superficie terrestre que tiene velocidades inferiores a la velocidad del flujo libre, de la zona de flujo que no está perturbado por la superficie y tiene velocidad constante. Como hemos dicho, la capa límite es aquella que está afectada por la superficie terrestre, por lo tanto, el grosor de dicha capa es la zona que queda comprendida entre la superficie y la línea continua. [16]

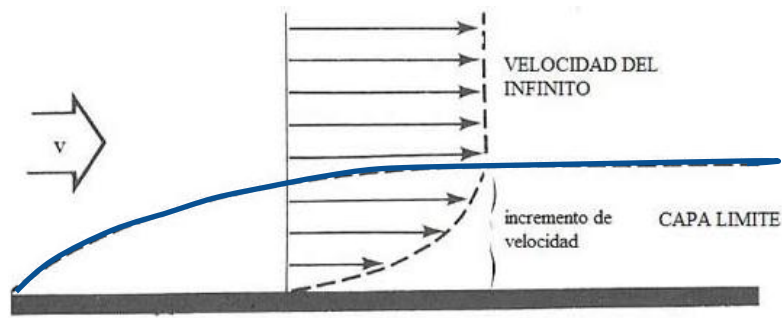


Figura 13. Capa límite atmosférica

Pero la capa límite no tiene un grosor constante, ya que depende del calentamiento de la superficie, de la fuerza del viento, de las características rugosas y topográficas de la superficie, de los movimientos verticales a gran escala y de la advección horizontal de calor y de humedad, entre otros factores. Por ello, la capa es más delgada cuando se encuentra sobre el mar o el hielo y en cambio tendrá más grosor sobre montañas, bosques y zonas urbanísticas. También cambia con la latitud ya que en los polos es más fina que en los trópicos. Puede oscilar entre las decenas de metros hasta dos kilómetros.

Además, dependiendo de cómo se mueve el fluido en el interior de la capa límite puede ser: laminar o turbulenta.



Figura 14. Capa límite laminar y turbulenta

El flujo laminar se caracteriza porque el movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastante regulares, separadas y perfectamente definidas dando la impresión de que se trata de laminas o capas más o menos paralelas entre si, las cuales se deslizan suavemente unas sobre otras sin que exista mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas.

En cambio, el flujo turbulento se caracteriza por ser un movimiento caótico, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos. Las componentes de la velocidad fluctúan de forma aleatoria, aun así se puede descomponer en un valor de velocidad media para poder realizar los cálculos y estudios necesarios. [17]

## 2.2 Estructura de la capa límite atmosférica

La estructura vertical de la capa límite tiene dos capas diferenciadas: la capa superficial o laminar y la capa exterior (ver *Figura 15*). Toda la capa límite va variando durante el ciclo diurno, debido al gradiente térmico originado por la energía solar. [18]

La capa exterior es la más afectada por los cambios de temperatura. Durante el día, se la conoce como la capa mezclada o capa límite convectiva y se forma debido al calentamiento superficial que provocan los rayos de sol, que a su vez produce una convección térmica. Cuando el aire caliente de la superficie asciende, crea inestabilidades y por ello es una capa muy turbulenta. Además, al irse calentando durante el día alcanza su espesor máximo por la tarde. En cambio por la noche, la capa

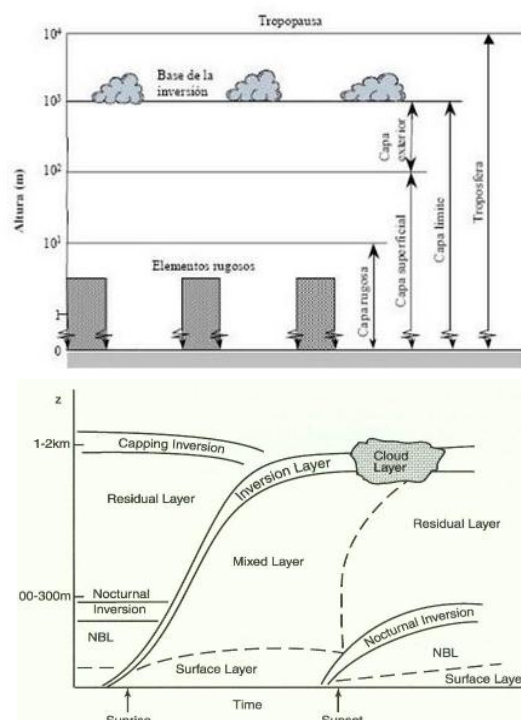


Figura 15. Estructura vertical de la capa límite atmosférica [19]

exterior se subdivide en dos capas: la capa estable nocturna (*Nocturnal Boundary Layer, NBL*) o capa límite estable (*Stable Boundary Layer, SBL*) y la capa residual o capa de entrañamiento. La capa estable nocturna tiene turbulencias esporádicas, porque al enfriarse la superficie antes que las capas más altas, vuelve a ser una capa térmicamente estable. Al aumentar la altura la inversión de temperaturas que la hacen ser estable disminuye o desaparece y da paso a la capa residual, con turbulencias moderadas. En cualquier caso, tanto por la mañana como por la noche a medida que aumenta altura el flujo depende menos de los efectos de la superficie terrestre mientras que el efecto de las fuerzas de Coriolis ganan importancia y el flujo deja de ser turbulento (capa de Ekman).

La capa superficial es la que se encuentra en contacto con la superficie. Se subdivide en dos capas; la subcapa de rugosidad y la subcapa inercial. La primera se caracteriza por estar dominada por la viscosidad superficial, es decir, depende directamente de la estructura de los elementos rugosos. Así pues, si se trata de una superficie como el mar que tiene pocos elementos rugosos, esta capa será muy fina, en cambio si se trata de una zona urbanística su espesor aumentara. La segunda subcapa que hemos mencionado, la subcapa inercial, está afectada por las características de la superficie. [20]

### **2.3 Características de la capa límite atmosférica**

---

A pesar que el flujo en la capa límite atmosférica es en su mayoría turbulento, y por tanto es un flujo caótico, se pueden realizar unas simulaciones fiables gracias a la estadística, y a los datos experimentales de otros estudios. Para poder hacer una simulación es necesario que se reproduzcan cuatro características fundamentales:

- La variación espacial de velocidades medias con la altura
- La distribución espacial de las tres componentes de la intensidad de turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la escala longitudinal)

- Las correlaciones longitudinales y transversales de las tres componentes de la turbulencia, usualmente referidas como las escalas longitudinales y laterales de la turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la escala longitudinal)
- Espectro de potencia de las tres componentes de la turbulencia (con frecuencia simplificada solamente a la componente longitudinal) [21]

### 2.3.1 Viento medio

Existen muchas expresiones teóricas usadas para determinar el perfil de velocidades del viento. Una de ellas es calculando la variación de velocidad respecto a la altura, y la expresión más simple que satisface nuestras necesidades (da resultados satisfactorios), es la ley exponencial de Hellmann [22]:

$$\frac{v}{v_0} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Siendo  $v$  la velocidad a la altura  $H$  que queremos calcular,  $v_0$  y  $H_0$  la velocidad y altura de referencia y  $\alpha$  es el coeficiente de rugosidad que depende del tipo de terreno (ver *Tabla 3*). La altura de referencia suele ser 10 metros, y el coeficiente de rugosidad se ajusta suficientemente bien para rangos de 10 a 100-150 metros siempre y cuando no haya obstáculos en forma de picos agudos en el terreno.

Categoría	Características del terreno	$\alpha$
I	Mar abierto, lagos de al menos 5km de longitud en la dirección del viento, terreno llano sin obstáculos	0.08 – 0.12
II	Granjas con setos, pequeñas estructuras agrarias ocasionales, casas o árboles	0.12 – 0.18
III	Áreas suburbanas o industriales, bosques permanentes	0.18 – 0.24
IV	Áreas urbanas con al menos el 15% de su superficie cubierta con edificios de altura media mayor de 15 m	0.24 – 0.40

Tabla 3. Clasificación de tipos de terreno por su categoría y el coeficiente de rugosidad de cada uno [23]

Para poder representar mejor los valores de la velocidad a alturas inferiores a 10 metros, se suele utilizar el modelo logarítmico, que viene definido por la siguiente expresión:

$$\frac{v(z)}{v_f} = \frac{1}{K} \cdot \ln\left(\frac{z-z_d}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

Siendo  $v_f$  la velocidad de fricción,  $K$  la constante de von Karman (normalmente se asume como 0.4),  $z$  la altura,  $z_0$  la longitud de la rugosidad del terreno y  $z_d$  es la altura de la superficie desplazada. A continuación hay una tabla con los valores de rugosidad aerodinámica, que usa el Eurocódigo 1 [24] para definir las velocidades entre  $z_{min} \leq z \leq 200$  metros:

Categoría terreno	I	II	III	IV
$z_0$ (m)	0.01	0.05	0.3	1
$z_{min}$ (m)	1	2	5	10

Tabla 4. Valores de rugosidad aerodinámica para la caracterización del perfil de velocidades de modelo logarítmico

### 2.3.2 Turbulencia

El flujo turbulento se caracteriza por ser un flujo irregular, tridimensional, difusivo y de disipación. A continuación detallamos su significado [25]:

- Irregularidad: Se manifiesta en la aparición de fluctuaciones de las variables fluidodinámicas (velocidad, presión, temperatura, intensidad, etc.) con tamaño y tiempos muy dispares (diferentes escalas). Esta aleatoriedad, hace que las coordenadas de tiempo y de espacio sean imposibles de determinar, y que se utilicen modelos estadísticos para estudiar este tipo de flujos.
- Tridimensionalidad: El flujo se define por sus características en cada una de sus componentes (longitudinal, lateral, vertical). Aunque la mayoría de veces sólo se estudia el longitudinal ya que suele tener más importancia en la dinámica de los torbellinos.

- Difusividad (“mixing”): La turbulencia aumenta el transporte de masa, la cantidad de movimiento y la transferencia de energía.
- Dispersión: A lo largo del tiempo la turbulencia necesita más energía para que se mantenga dicha perturbación sino acabará desapareciendo. Lo podemos comprobar analizando la ecuación de energía cinética:

$$\varepsilon \approx \frac{v^2}{T_k} \quad (2.3)$$

Siendo  $\varepsilon$  la energía cinética o acumulación de energía del espectro,  $v$  la velocidad del flujo y  $T_k$  la escala temporal. Normalmente, la turbulencia tiende a mantenerse extrayendo energía del flujo principal e invirtiéndola en aumentar la energía interna, haciendo aumentar las pérdidas por viscosidad y a su vez requerir más energía. Si la turbulencia se aleja mucho de su fuente de perturbación, los torbellinos disminuirán su diámetro porque esta disipando energía para mantener la velocidad y acabará desapareciendo.

Pero como hemos visto al inicio de este punto, para la modelación de la turbulencia nos centraremos en el estudio de la intensidad de turbulencia, las escalas de longitud y el espectro de turbulencia.

- Intensidad de turbulencia: es el parámetro más simple y utilizado para definir la turbulencia. Nos indica cuan turbulento es el flujo que estamos estudiando.
- Escalas de longitud: dan el tamaño de los remolinos en cada una de sus componentes. La proximidad con la superficie afecta a dicho parámetro, ya que como más cerca estén, el tamaño del torbellino disminuirá y a su vez se reducirá la escala de longitud.
- Espectro de turbulencia: describe el contenido de las variaciones de frecuencia de la velocidad del viento. Existen dos alternativas que se usan habitualmente para calcular la densidad de espectro de turbulencia, una es el espectro de

Kaimal que proporciona una mejor observación empírica de la turbulencia atmosférica, y la otra es el espectro de von Karman (ecuación 2.4) la cual proporciona una buena descripción de la turbulencia en túneles de viento.

$$S_u = \frac{4 \cdot f_u}{(1 + 70.8 \cdot f_u^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (2.4)$$

Siendo  $S_u$  la densidad espectral de Karman y  $f_u$  es una función que depende de las escalas de longitud de turbulencia. [26]



**3**

## **DISEÑO GEOMÉTRICO**

### 3. DISEÑO GEOMÉTRICO

Dos de los factores más importantes al diseñar túneles de estudio de capa límite, son minimizar las pérdidas de carga e intentar que la corriente no se desprenda de las paredes. Por ello, se caracterizan por tener una cámara de ensayos con una longitud varias veces superior a la sección transversal para que la capa límite se pueda desarrollar.

La maqueta a realizar, está hecha a escala 1:5 del túnel aerodinámico ACLA-16 de la IDR/UPM. Es un túnel abierto con cámara de ensayos cerrada, que consta de un motor que proporciona una velocidad media de 20 m/s en la entrada del túnel, de una superficie adaptadora para unir la salida del ventilador con la entrada de la cámara de ensayos, de una honeycomb para tener un flujo no turbulento, una rejilla para uniformarlo todo y una cámara de ensayos. Además, para estudiar como evoluciona la capa límite según varias rugosidades y tipos de terreno, se han construido distintos modelos para distorsionar el flujo y recrear la capa límite tal y como sería en la realidad. Los elementos utilizados con este fin son tales como bloques, para simular la rugosidad, y agujas, también conocidas por su nombre en inglés *spires*, para reproducir la turbulencia (ver *Figura 16*).

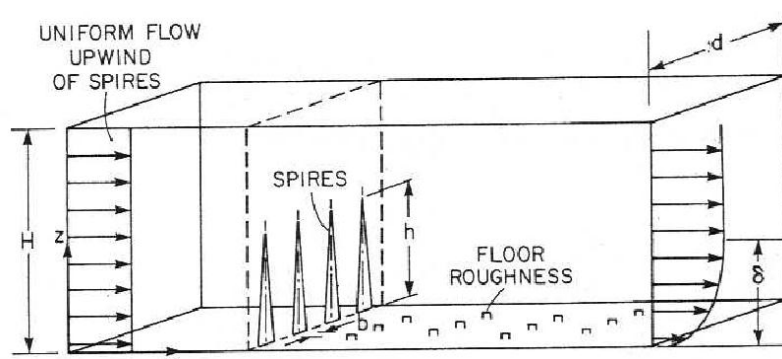


Figura 16. Esquema representativo del túnel con las agujas (*spires*) y los bloques (*floor roughness*)

Según la escala de terreno estudiaremos dos casos; la escala 1:200 y la escala 1:50. La primera representa terrenos urbanos con grandes edificios y rascacielos, en cambio, la segunda representa zonas no tan urbanizadas o de menor altura que también afectan significativamente la capa límite atmosférica. Las categorías estudiadas son las que ya se han mencionado anteriormente: categorías I, II, III y IV.

### 3.1 Datos característicos del túnel

- Sección transversal: 38 X 38 cm<sup>2</sup>
- Longitud: 265 cm
- Honeycomb
- Rejilla
- 5 puntos de control: el primero a 15 cm desde el principio de la cámara de ensayos y se alejan a una distancia de 50 cm entre ellos.

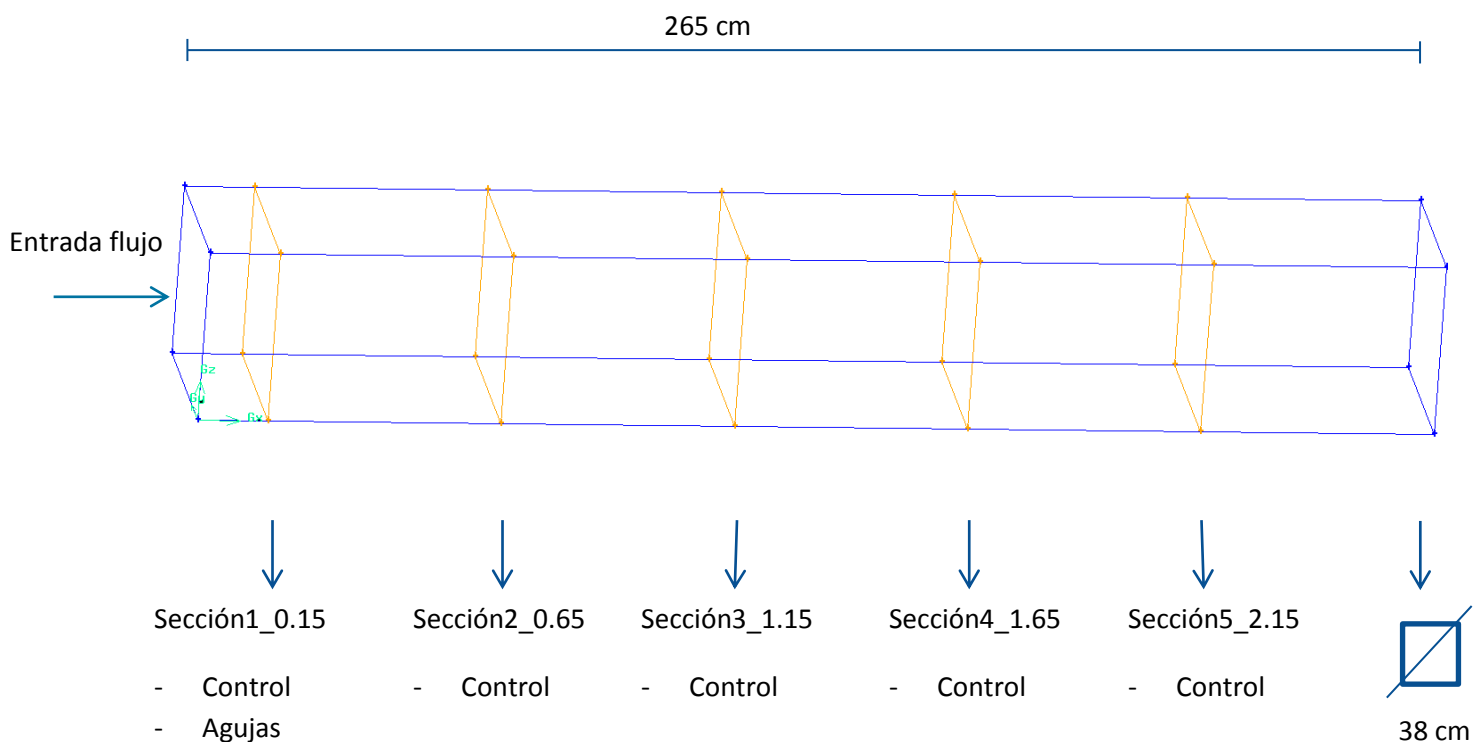


Figura 17. Esquema del túnel aerodinámico

### 3.2 Elementos para la simulación de la capa límite

- Bloques: se caracterizan por ser una superficie de cubos que sigue un patrón rectangular y que se ubican en el suelo del túnel. Sirven para simular la rugosidad a pequeña escala, y según el valor de ésta los cubos tienen un tamaño y un espaciado entre ellos determinado. En la siguiente tabla (ver *Tabla 5*) podemos ver los datos de diseño de la malla cúbica según la categoría de terreno y de escala que representan.

Categoría	Nombre	Escala	Sección cúbica (cm <sup>2</sup> )	Separación entre cubos
-	-	-	Superficie lisa	-
CAT III	$R_1$	1:50	2,5 x 2,5	9,5
	$R_2$	1:200	1 x 1	3,8
CAT IV	$R_3$	1:50	2'5 x 2,5	7,6
	$R_4$	1:200	1 x 1	2,6

Tabla 5. Características de la rugosidad a pequeña escala simulada

- Representación de la rugosidad  $R_1$  (en cm)

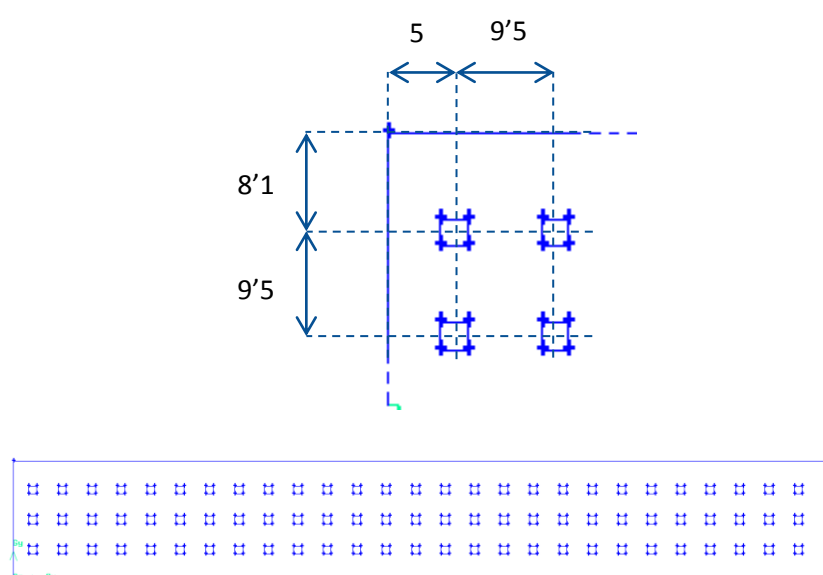


Figura 18. Rugosidad 1

- Representación de la rugosidad  $R_2$  (en cm)

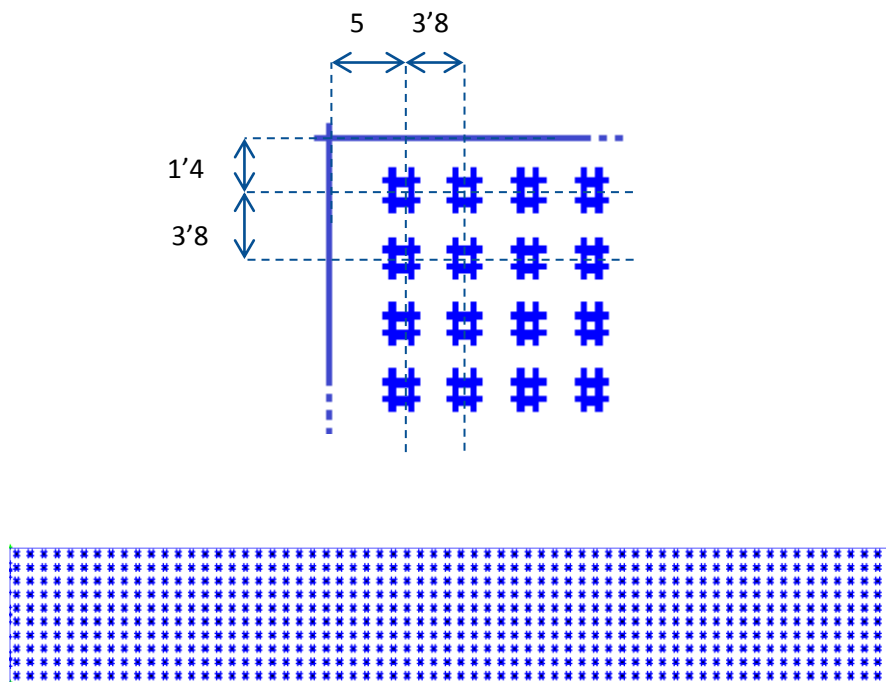


Figura 19. Rugosidad 2

- Representación de la rugosidad  $R_3$  (cm)

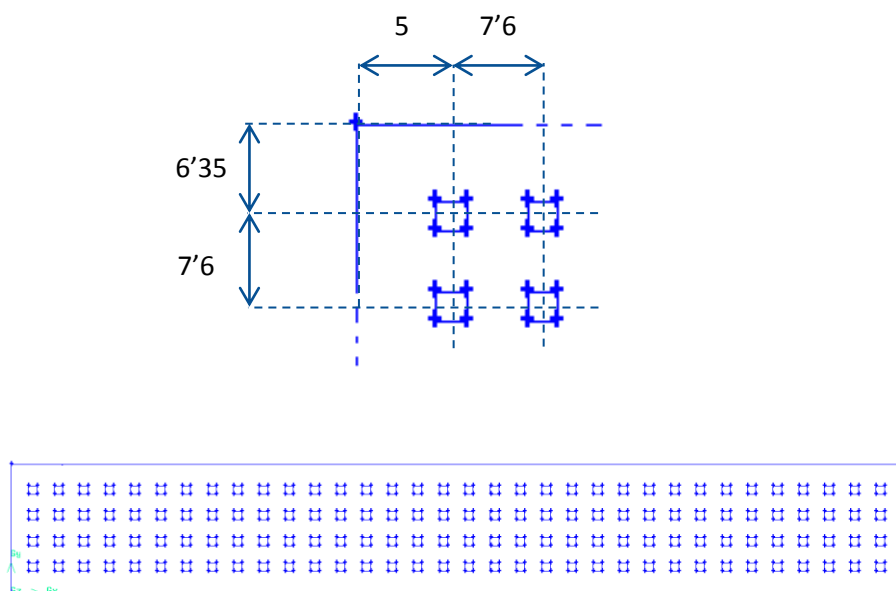


Figura 20. Rugosidad 3

- Representación de la rugosidad  $R_4$  (cm)

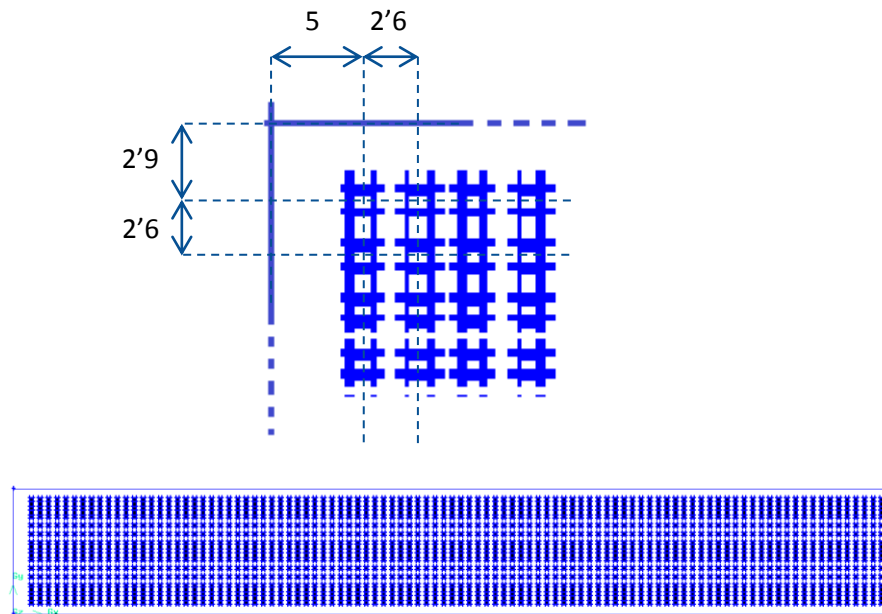


Figura 21. Rugosidad 4

- Aguja (*spires*): sirven para simular el tipo de terreno y se caracterizan por ser agujas del tipo Irwin que consisten en una serie de triángulos esbeltos que perturbarán el flujo tal y como lo haría el tipo de terreno que representan, generando los torbellinos propios de la capa límite real. Dichos triángulos presentan una cara al viento, mientras la cara de sotavento tiene una placa de refuerzo (ver *Figura 22*). Para simular bien la capa límite es mejor poner tres agujas para que perturbe todo el flujo que entra en la sección, siguiendo la distribución que aparece en la *Figura 23*. En la tabla siguiente (ver *Tabla 6*) podemos ver los parámetros geométricos de cada modelo de perturbación según el tipo de terreno que representa:

Categoría	Triángulo	Separación x (cm)	Separación p (cm)	b (cm)	h (cm)
I	$T_1$	12,5	12,5	2,5	29,5
II	$T_2$	12,5	12,5	3	29
III	$T_3$	12,5	12,5	4	28
IV	$T_4$	12,5	12,5	4,5	27

Tabla 6. Características las agujas según el tipo de terreno simulado

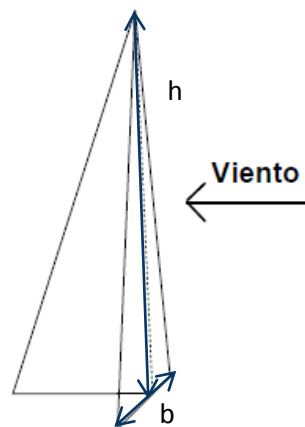


Figura 22. Esquema triángulo tipo Irwin

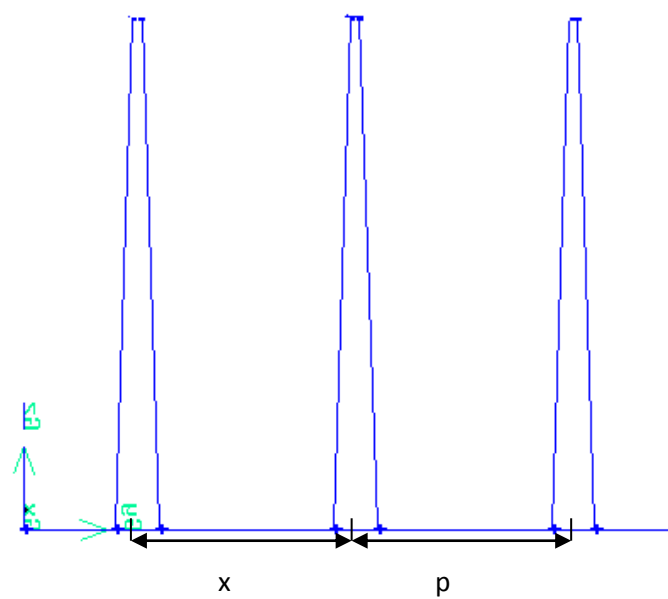


Figura 23. Representación esquemática de la posición de las agujas

**4**

## **PLANTA MOTRIZ**



## 4. PLANTA MOTRIZ

### 4.1 Definición

---

La planta motriz es la encargada de proporcionar una corriente de aire continua al túnel de viento. Como hemos visto, se puede situar aguas arriba o aguas abajo de la cámara de ensayos ya que puede ser de soplado o de aspirado, respectivamente. Esta formada por tres elementos esenciales; uno o varios ventiladores que proporcionan el salto de presiones necesario mediante el flujo en movimiento, uno o varios motores eléctricos para proporcionar la potencia necesaria a los ventiladores y, por último, un sistema de regulación de frecuencia.

Para seleccionar una planta motriz se tienen que tener en cuenta diversos aspectos para obtener la más apropiada, pero los dos más importantes, y en base a ellos se llevara a cabo la elección, son: que tenga potencia necesaria para contrarrestar las pérdidas de carga y que sea suficientemente grande como para adaptarlo a la entrada del túnel. En este segundo caso, si la sección del túnel es muy grande, cabe la posibilidad que en vez de instalar un solo ventilador se instale una matriz de ventiladores.

Otros parámetros que también se tienen en cuenta es dónde se va a ubicar el ventilador ya que si es dentro de una habitación, factores como las dimensiones geométricas de ésta, si esta insonorizada y si es de fácil acceso condicionarán nuestra elección por un tipo de ventilador con un tamaño, nivel acústico y sistema de mantenimiento específico. También se tienen que tener en cuenta el coste, el rendimiento y la finalidad para la que se diseña el túnel, ya que si la funcionalidad del túnel es trabajar a bajas/altas presiones, a altas temperaturas, en sitios con mucha polución, etc., nos forzará a elegir el que mejor se adapte a los requisitos de diseño.

Para encontrar el mejor ventilador podemos hacer dos cosas; o bien, diseñamos nosotros mismos un ventilador o una matriz de ventiladores, o por el contrario, buscamos en el catálogo comercial cuál es el que mejor cubre nuestras necesidades. En el primer caso, aseguramos un buen rendimiento y con pérdidas de carga mínimas,

el problema es que es mucho más costoso tanto de dinero como de tiempo, y además se dispondría de piezas de recambio con facilidad. Por otro lado, la segunda opción es mucho más barata, más rápida para instalar pero se tendrá que adaptar la sección del ventilador con la sección del túnel tanto en forma como en medidas. A pesar de ello, escoger un ventilador comercial es la opción más adecuada en este caso, ya que necesitamos un ventilador con características aceptables, sin necesidad de que trabaje con eficiencia máxima, o con el mínimo de pérdidas de carga, ya que su finalidad es probar la simulación del ACLA-16 y, además, ahorramos costes de tiempo y dinero.

## 4.2 Requisitos

---

Los requisitos básicos para elegir el ventilador, es determinar la pérdida de presión que tiene que salvar (ver Anexo 2), el caudal necesario y la potencia que debe tener la planta motriz. Para la sección de entrada del túnel de viento que es cúbica con los costados de 380mm y con una velocidad máxima de 20 m/s obtenemos los siguientes parámetros:

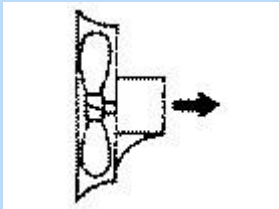
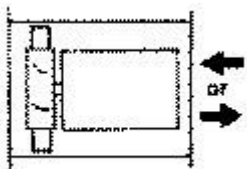
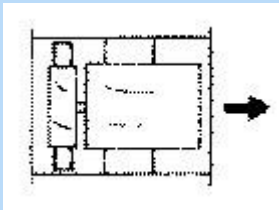
- Caudal:  $Q = v \cdot A_{sección} = 2'888 \frac{m^3}{s}$
- Diferencia de presiones:  $\Delta p_{total} = 67'51 Pa$
- Potencia planta motriz:  $N = Q \cdot \Delta p_{total} = 195'02 W$

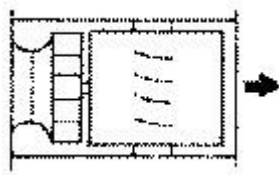
Además, le sumamos otro requisito y es que sea un ventilador centrífugo. Con estos datos se ha buscado en los catálogos comerciales de las empresas Airtècnics y Sodeca, ya que han subministrado ventiladores en otros proyectos y dan un buen servicio.

### 4.3 Tipos de ventiladores

Se pueden diferenciar dos tipos; los axiales y los centrífugos.

- Ventiladores axiales:** Son aquellos en los cuales el flujo de aire sigue la dirección del eje de rotación. Se suelen llamar helicoidales, pues el flujo a la salida tiene una trayectoria con esa forma. En líneas generales son aptos para mover grandes caudales a bajas presiones. Con velocidades periféricas medianamente altas son en general ruidosos. Suelen subclasificarse, por la forma de su envolvente, de la siguiente manera:

VENTILADOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
 <p><b>HELICOIDAL</b></p>	<p>Ventiladores aptos para mover grandes caudales de aire con bajas presiones. Son de bajo rendimiento. La transferencia de energía se produce mayoritariamente en forma de presión dinámica.</p>	<p>Se aplica en circulación y extracción de aire en naves industriales. Se instalan en pared sin ningún conducto. Utilizados con objetivo de renovación de aire.</p>
 <p><b>TUBE AXIAL</b></p>	<p>Tienen rendimiento algo superior al anterior y es capaz de desarrollar una presión estática mayor. Por su construcción es apto para intercalar en conductos.</p>	<p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado que requieran altos caudales con presión media a baja. También se utiliza en algunos sistemas industriales como cabinas de pintura y extracciones localizadas de humos.</p>
 <p><b>VANE AXIAL</b></p>	<p>Con diseños de palas AIRFOIL, permiten obtener presiones medias y altas con buenos rendimientos. Las palas pueden ser fijas o de ángulo ajustable.</p>	<p>Tiene aplicaciones similares a los TUBEAXIAL, pero con la ventaja de tener un flujo más uniforme y la posibilidad de obtener presiones mayores. Para una determinada prestación es relativamente más pequeño que el ventilador centrífugo equiparable.</p>



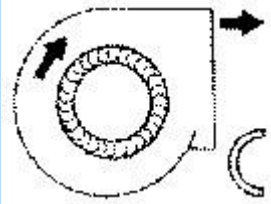
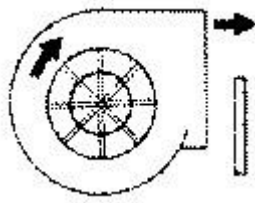
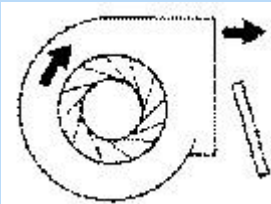
**CENTRIFOIL**

Se trata de un ventilador con rotor centrífugo pero de flujo axial. Es decir reúne las ventajas del ventilador centrífugo y la facilidad de montaje de un axial con el consiguiente ahorro de espacio.

Las mismas aplicaciones que el ventilador VANEAXIAL.

Tabla 7. Tipos de ventiladores axiales [27]

- Ventiladores centrífugos: Son aquellos en los cuales el flujo de aire cambia su dirección, en un ángulo de 90°, entre la entrada y salida. Se suelen subclasificar, según la forma de las palas o álabes del rotor, de la siguiente manera:

VENTILADOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
 <p><b>CURVADAS HACIA ADELANTE</b></p>	<p>Rotor con palas curvadas hacia adelante, apto para caudales altos y bajas presiones. No es autolimitante de potencia. Para un mismo caudal y un mismo diámetro de rotor gira a menos vueltas con menor nivel sonoro.</p>	<p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión.</p>
 <p><b>PALAS RADIALES</b></p>	<p>Rotor de palas radiales. Es el diseño más sencillo y de menor rendimiento. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. El diseño le permite ser autolimpiante. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.</p>	<p>Empleado básicamente para instalaciones industriales de manipulación de materiales. Se le puede aplicar recubrimientos especiales anti-desgaste. También se emplea en aplicaciones industriales de alta presión.</p>
 <p><b>INCLINADAS HACIA ATRAS</b></p>	<p>Rotor de palas planas o curvadas inclinadas hacia atrás. Es de alto rendimiento y autolimitador de potencia. Puede girar a velocidades altas.</p>	<p>Se emplea para ventilación, calefacción y aire acondicionado. También puede ser usado en aplicaciones industriales, con ambientes corrosivos y/o bajos contenidos de polvo.</p>

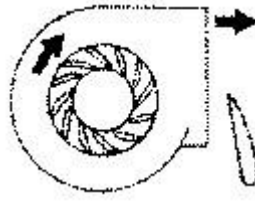
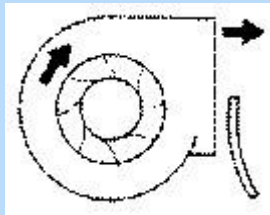
 <p><b>AIRFOIL</b></p>	<p>Similar al anterior pero con palas de perfil aerodinámico. Es el de mayor rendimiento dentro de los ventiladores centrífugos. Es autolimitante de potencia.</p>	<p>Es utilizado para aplicaciones en sistemas de HVAC y aplicaciones industriales con aire limpio. Construcciones especiales para utilizarse en aplicaciones con aire sucio.</p>
 <p><b>RADIAL TIP</b></p>	<p>Rotores de palas curvadas hacia delante con salida radial. Son una variación de los ventiladores radiales pero con mayor rendimiento. Son autolimpiantes. La potencia aumenta de forma continua al aumento del caudal.</p>	<p>Como los radiales estos ventiladores son aptos para trabajar en aplicaciones industriales con movimiento de materiales abrasivos, pero con un mayor rendimiento.</p>

Tabla 8. Tipos de ventiladores centrífugos [27]

#### 4.4 Características planta motriz

Al conocer la mayoría de los ventiladores que existen en el mercado se decide optar por un ventilador centrífugo de palas curvadas hacia atrás ya que satisface las aplicaciones del proyecto.

Buscando por los dos catálogos se ha escogido una planta motriz de la casa Airtècnics con código de referencia DHAD 450 – 4. Dicha planta motriz es de fabricación alemana de la empresa Rosenberg Ventilatoren GmbH.

Los requisitos de selección los cumple sobradamente ya que puede proporcionar un caudal de hasta  $4'25 \text{ m}^3/\text{s}$ , salvar una variación de presión máxima de 740 Pa y tiene una potencia máxima de 2'1 KW. Este fue el escogido ya que los demás ventiladores, o no cumplían con alguna de las tres características, o bien eran más caros o de mayores dimensiones.

Las partes generales de la planta motriz, a parte del motor que no se ve ya que queda tapado por la envolvente y los rodets, son:

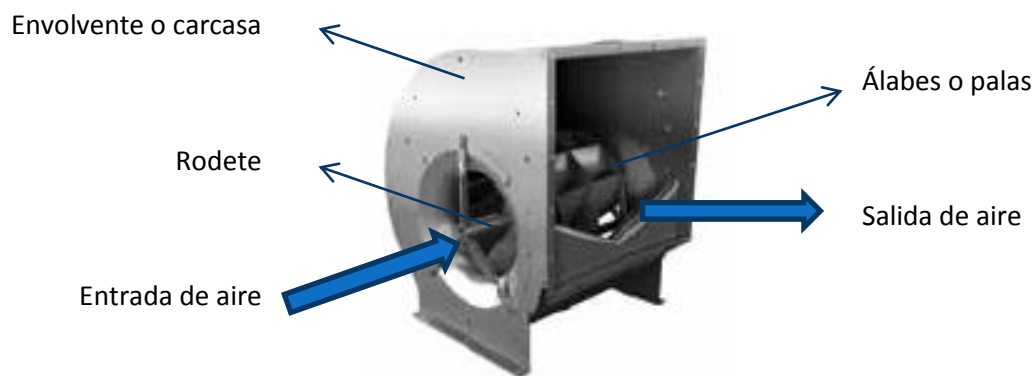


Figura 24. Partes de la planta motriz tipo DHAD 450 – 4

Además, el código de referencia proporciona mucha información acerca de las características de la planta motriz:

- D: Doble entrada o de doble oído, significa que el aire entra por ambos lados de la envolvente succionado por dos rodetes sencillos montados lado a lado.
- H: Ventilador centrífugo con los álabes curvados hacia atrás de gran eficiencia
- A: Motor directo de rotor externo
- D: Trifásico
- 450: Diámetro de turbina
- 4: número de polos

Las hélices están hechas de aluminio y hay diez hojas por cada rotor que las soporta (ver *Figura 25*). Su sentido de rotación es antihorario mirando desde la salida de los cables.



Figura 25. Dos turbina con diez álabes curvados hacia atras

La carcasa de la turbina es rectangular, esta hecha de acero galvanizado y las partes laterales se ensamblan con tuercas fijas por la parte inferior.

La serie DHAD cumple con la normativa alemana R20 y DIN 323, en referencia al tamaño, y la turbina esta equilibrada dinámica y estáticamente según la norma DIN/ISO 1940.

Su curva de rendimiento y las características geométricas se encuentran en el Anexo 4, juntamente con la información técnica que vemos a continuación (ver *Tabla 9*).

Tipo DHAD 450 – 4	
Frecuencia (Hz)	50
U - Tensión (V)	3 x 400
P - Potencia (kW)	2'1
I - Intensidad (A)	3'65
n - Velocidad (rpm)	1340
tr – Temperatura máxima (°C)	55
Peso (kg)	62

Tabla 9. Información técnica del DHAD 450 - 4

## 4.5 Instalación eléctrica

---

### 4.5.1 Requisitos

Para la instalación eléctrica del motor debemos tener en cuenta varias cosas:

- El motor trabaja a 50 Hz con señal trifásica, voltaje 400V e intensidad de 3'65A. Por otro lado, la red eléctrica europea proporciona frecuencia de 50 Hz (60 Hz en los Estados Unidos), trabaja con señal monofásica, voltaje 230V e intensidad de 9'13A. Así pues, se tendrá que pasar de monofásico a trifásico.
- Utilizar un variador de frecuencia para controlar la velocidad a la que gira el motor, que trabaje a 50 Hz y que varíe de 10% a 100% Hz.
- Es necesario diseñar un circuito de potencia que es donde irá conectado el motor y un circuito de maniobra para conectar el ordenador u otros elementos que sean necesarios.
- Utilizar un cuadro metálico referenciado en la misma tierra que la carcasa del motor para evitar campos electromagnéticos.
- Diseñarlo según la normativa de baja tensión ERE BT 2002

### 4.5.2 Elementos básicos

Elementos básicos para el circuito eléctrico a diseñar y sus características más importantes:

- Cuadro de control. Servirá para monitorizar el sistema eléctrico.
- Interruptores. Son elementos de seguridad eléctrica. Se utilizan tres tipos distintos:
  - Interruptor de carga: es un interruptor de paro de emergencia que se instala en la cabecera del circuito. Es de fácil acceso y sirve para abrir todo el circuito e



- impedir la circulación eléctrica (corte). Tendrá de ser del tipo 2x20A, lo que quiere decir que tendrá 2 polos y la corriente nominal será de 20 A.
- Interruptor automático: se caracteriza por interrumpir la corriente sin ninguna actuación externa, cuando en el circuito hay sobreintensidades debidas a cortocircuitos o sobrecargas de la red. Tendremos dos interruptores de este tipo, uno para cada circuito.
    - El perteneciente al circuito de maniobra será para cargas pequeñas, con dos polos, intensidad nominal 10A e intensidad de corte 3kA (C 2x10A 3kA).
    - El interruptor automático del circuito de potencia será omnipolar de dos fases, con dos polos, intensidad nominal de 10A e intensidad de corte 5kA. Este interruptor es más robusto que el del circuito de maniobra ya que el corto circuito que se puede producir es mayor.
  - Interruptor diferencial: tiene la capacidad de detectar la diferencia entre la corriente de entrada y la de salida del circuito. Cuando la diferencia supera un valor determinado (sensibilidad) para el que está calibrado, este abre el circuito interrumpiendo el paso de corriente.
    - El interruptor del circuito de maniobra tendrá dos polos, con tensión nominal de 25A y sensibilidad de 30mA, ya que es para protección humana.
    - El interruptor diferencial del circuito de potencia también tendrá dos polos y tensión nominal de 25A, pero la sensibilidad será de 300mA.
  - Variador de frecuencia. Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. En nuestro caso a la entrada del variador disponemos de corriente monofásica y a la salida tendremos corriente trifásica, por lo tanto el variador realizará el cambio de fase.
  - Cables. Es el elemento por donde circula la señal y la lleva de un componente a otro. Es muy importante escoger bien el cableado para reducir pérdidas en el circuito y evitar interferencias inducidas por las propias intensidades. Se usarán

dos tipos de cable, uno para el transporte de señal monofásica y el otro para el transporte de señal trifásica.

- El cable para señal monofásica será de tipo 3x4mm (2G4) que significa que un cable transportara la fase, otro será el neutro y el tercero será la tierra (G de *ground*). El diámetro de todo el cable será de 4mm<sup>2</sup>.
- El cable destinado a la señal trifásica se caracteriza por ser RZ 0'6/1kV 4x2'5mm<sup>2</sup> y apantallado. Eso significa que es un cable con aislamiento de polietileno reticulado cableado en hélice visible, te tensión nominal 0'6/1kV, de cuatro conductores de aluminio de sección 25 mm<sup>2</sup>.

### 4.5.3 Esquema eléctrico

A continuación podemos ver el esquema del sistema eléctrico del túnel aerodinámico, donde están representados e identificados cada uno de los componentes descritos con anterioridad.

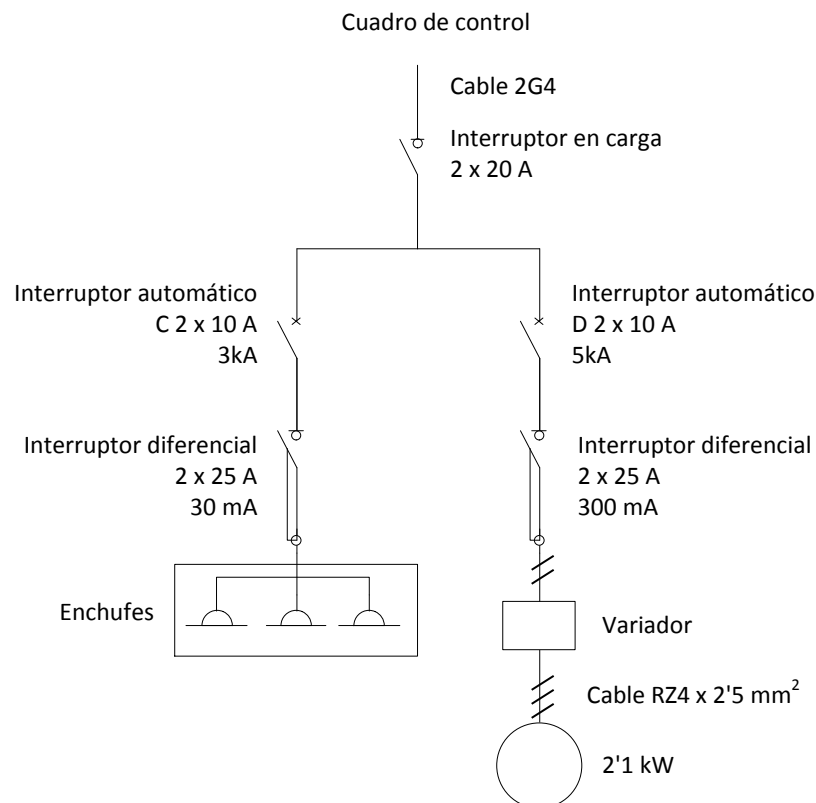


Figura 26. Esquema del sistema eléctrico del túnel

#### 4.5.4 Elección componentes del mercado

Ahora tenemos que buscar en los diversos catálogos comerciales cada uno de los componentes necesarios. Hay distintas empresas suministradoras de componentes electrónicos como Siemens, ABB, Chint y Schneider. Lo mejor es obtener los componentes de la misma marca ya que así nos aseguramos de que sean compatibles. En este caso se han escogido los modelos de la marca Schneider ya que se han empleado anteriormente y han dado buenos resultados. La ficha técnica de cada producto (*data sheet*) se puede encontrar en el Anexo 3.

Elemento		Modelo	Precio
Interruptor de carga		Carga I con señalización – 2P – 20A	38'28
Interruptor automático	Circuito de maniobra	24336 C60N 2P 10A curva C	46'93
	Circuito de potencia	24658 C60N 2P 10A curva D	97'74
Interruptor diferencial	Circuito de maniobra	A9R61225 iID 2P 25A 30mA tipo A-SI	152'02
	Circuito de potencia	A9R84225 iID 2P 25A 300mA tipo AC	151'65
Variador		ATV61HU30M3 3kW – 240V	731
Cable monofásico (4m)		1714308 NGP	39'46
Cable trifásico (2m)		1121407 RZ1-K (AS) 0'6/1 kV	8'3

Tabla 10. Modelos y precios de los elementos eléctricos del circuito

**5**

## **FABRICACIÓN**

## 5. FABRICACIÓN

### 5.1 Materiales

---

Para la construcción de la maqueta del túnel y para los elementos que simularán la rugosidad y el tipo de terreno, se utilizarán aquellos materiales de fácil adquisición y de bajo coste que sean suficientemente buenos para resistir y cumplir las exigencias del túnel aerodinámico.

Materiales elegidos para la construcción:

- Tablero de contrachapado de 2 cm de espesor
- Tablero de contrachapado de 2'5 cm de espesor
- Chapa de madera natural de 0'6 cm de espesor
- Clavos para unir los contrachapados
- Pegamento

### 5.2 Proceso de fabricación

---

La fabricación se llevará a cabo encima de la mesa dónde se realizarán los ensayos. Comparada con un túnel aerodinámico de características normales, la maqueta ocupará menos espacio y será considerablemente menos pesada, por lo que no será necesario fabricar otra estructura que ayude a soportarla.

#### 5.2.1 Túnel aerodinámico

Al constar únicamente con la cámara de ensayos, podremos fabricar la maqueta de una sola pieza.

El primer paso a realizar es cortar el contrachapado de 2 cm de espesor teniendo en cuenta que se debe cortar en listones con dos medidas diferentes. Unos se usan

para las paredes verticales, y los otros para las paredes horizontales (techo y suelo). Los tableros verticales miden  $38 \times 265 \text{ cm}^2$  y los tableros horizontales  $42 \times 265 \text{ cm}^2$ . Se montarán según la *Figura 27*, así aseguramos que la cámara de ensayos tiene las medidas diseñadas de  $38 \times 38 \text{ cm}^2$ .

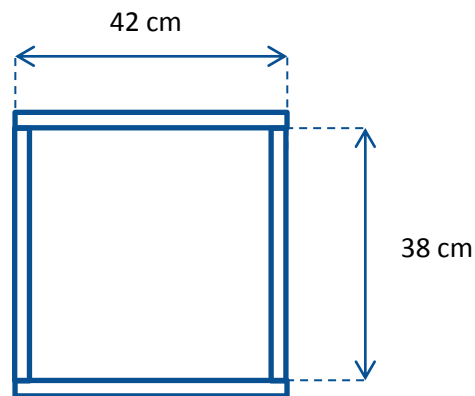


Figura 27. Sección transversal túnel

Los tableros se fijan unos con otros mediante clavos, los cuales serán embutidos por la parte exterior de éstos para mantener las paredes del interior del túnel lo más lisas y libres de perturbaciones posibles.

### 5.2.2 Simulaciones de capa límite

- Simulación rugosidad

Se dibuja la matriz de rugosidad que se va a construir en la chapa de madera, y luego con el pegamento se adhieren los cubos de la rugosidad deseada, que previamente han sido cortados del tablón de 2'5 cm de espesor.

- Simulación de vórtices

De la chapa de madera se tallan los triángulos de todas las medidas requeridas, juntamente con los refuerzos, que son de la misma altura que el triángulo en sí. Se engancha el refuerzo perpendicularmente en una de las superficies del triángulo y se montan los tres triángulos sobre la misma base de chapa.

**6**

# **INSTRUMENTACIÓN**

## 6. INSTRUMENTACIÓN

Un aspecto básico y muy importante de los túneles de viento es la instrumentación. Es esencial tenerla para poder controlar las variables y sobretodo para obtener los resultados del ensayo. Por ello, se suelen colocar instrumentos cerca del objeto a ensayar, para ver como éste modifica el flujo y poder prever que pasara en la realidad.

Las variables que se suelen medir en los túneles aerodinámicos con tales como:

- La presión (estática y total)
- La velocidad
- La temperatura
- El nivel de turbulencia
- La humedad relativa del aire (su variación provoca el cambio de la constante R del aire).

Dependiendo de la finalidad del ensayo se utilizarán unos u otros o se instalarán en una configuración u otra, siempre teniendo en cuenta que su ubicación no debe modificar de forma drástica el comportamiento del flujo en la cámara de ensayos. Los que normalmente se utilizan son:

- Tubos de Pitot para medir la presión estática, la total y con ello, obtener las velocidades
- Anemómetros para medir velocidades e intensidades de turbulencia
- Manómetros para obtener las diferencias de presión
- Transductores de presión para convertir las señales de presión en señales eléctricas
- Balanzas aerodinámicas para medir las cargas sobre el modelo
- Dispositivos para la visualización del flujo, como pueden ser cámaras y mecanismos de inyección de humo

En el caso que nos ocupa, queremos obtener resultados de velocidad y turbulencia, y al ser un ensayo simple, es decir, es una maqueta dónde solo hay una cámara de



ensayos y por tanto las variables como la presión y la humedad relativa se pueden considerar constantes, únicamente utilizaremos anemómetros.

En el mercado hay distintos tipos de anemómetros y principalmente se dividen en dos grupos; los anemómetros de Láser – Doppler y los anemómetros de hilo caliente.

- Anemómetros Láser – Doppler: tienen como principal característica (y ventaja) que no se introducen en la cámara de ensayos por lo que no perturban el fluido. Funcionan con un rayo láser, que al incidir sobre las partículas en movimiento, es reflejado con distintas frecuencias y un fotodetector recoge la luz dispersada, la procesa y obtiene la velocidad del flujo.
- Anemómetros de hilo caliente: Se trata de un instrumento compuesto por un conductor eléctrico que será calentado mediante corriente eléctrica y, al mismo tiempo, enfriado por la corriente de flujo. El conductor eléctrico suele ser un filamento de Tungsteno o Platino, de longitud del orden de milímetros mientras su diámetro es del orden de micras. Al ser metales su conductividad depende de la temperatura, por ello el hilo funciona a modo de resistencia.

Se utilizan para medir bajas velocidades pero aun así son muy frágiles ya que el hilo conductor con el que realizan las mediciones puede romperse con facilidad por el impacto de alguna partícula pesada suspendida en el aire, por lo que es necesario revisar frecuentemente el instrumento. De todos modos, este es el tipo de anemómetro que utilizaremos ya que cumple las características necesarias para medir velocidades, y además son más baratos y más sencillos de instalar que los anemómetros Láser-Doppler. Por ello nos extendemos un poco más para entender su funcionamiento.

Hay dos maneras de funcionamiento:

- El conductor eléctrico se alimenta con una intensidad constante, y como la resistencia depende de la temperatura, se mide la variación de esta.

- Se busca mantener constante la temperatura en el conductor eléctrico y se mide la tensión necesaria para llevarlo a cabo.

En ambos casos, el hilo conductor esta integrado en un puente de Wheatstone para medir con precisión los cambios en el valor de la resistencia.



Figura 28. Anemómetro de hilo caliente

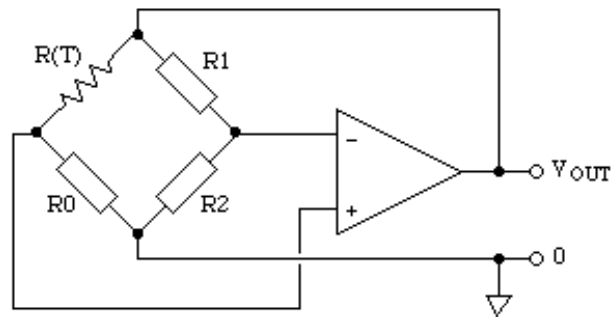


Figura 29. Circuito de anemómetro de hilo caliente con el puente de Wheatstone

El calor disipado viene dado por la ley de Joule (ecuación 6.1), pero el calor disipado entre el conductor y el fluido que lo rodea viene dado por la ley de King (ecuación 6.2).

$$Q = R_h \cdot I^2 \quad (6.1)$$

$$\frac{Q}{R_h - R_h \cdot T_\infty} = A + B \sqrt{U_\infty} \quad (6.2)$$

Siendo  $R_h$  la resistencia eléctrica del hilo,  $I$  la intensidad de la corriente,  $T_\infty$  la temperatura del fluido sin perturbar,  $U_\infty$  la velocidad del flujo sin perturbar y A y B, dos constantes que dependen de las características físicas y geométricas de la cámara de ensayos o conducto.

Se ha decidido optar por dos anemómetros de hilo caliente de la empresa PCE-Instruments, que miden la velocidad, la temperatura del aire y calcula el caudal. Además, tienen una transmisión directa de datos al ordenador, por lo que será más fácil analizar los datos obtenidos. Son del mismo modelo, pero se realiza el pedido de dos para poder comparar los resultados. La ficha técnica del anemómetro PCE-009 esta en el Anexo 3.



Figura 30. Anemómetro PCE-009

**7**

## **ANÁLISIS DE COSTES**

## 7. ANÁLISIS DE COSTES

Los costes totales de todo el proyecto se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Fabricación
- Planta potencia
- Instalación eléctrica
- Instrumentación

A continuación hacemos un breve repaso de los tres grandes grupos para analizar qué cuesta cada elemento.

- Fabricación

Para fabricar la cámara de ensayos pertinente se necesitan tableros de contrachapado de 2 cm de grosor, que se comercializan en dimensiones estándar de 244 cm x 12 cm (2.928 cm<sup>2</sup>) y cuestan 60 €. También son necesarias chapas de madera de 6 mm de espesor que cuestan 3'88 €/m<sup>2</sup> para poder pegar las rugosidades y construir las agujas. Además será necesario adquirir tableros contrachapados para tallarlos en cubos de 1 cm y 2'5 cm de espesor. Por ello se adquiere una fracción de medida 60 cm x 60 cm de espesor 2'5 cm que cuesta 22'49 € la unidad. En la siguiente tabla (*Tabla 10*) podemos ver las unidades necesarias para cada elemento y el precio total del pedido:

Elemento	Unidades	Precio (€)	Precio total (€)
Paredes del túnel	8 tableros	60 /unidad	480
Superficie rugosidad y triángulos	4'5 m <sup>2</sup>	3'88 /m <sup>2</sup>	17'46
Cubos	1	22'49 /unidad	22'49

Tabla 11. Precios de fabricación

- **Planta potencia**

La planta potencia conlleva los costes de la propia planta motriz, y de la instalación eléctrica escogida.

La planta motriz DHAD 450 – 4, la utilizada en este proyecto, cuesta 1.868 €.

- **Instalación eléctrica**

El precio de los elementos eléctricos necesarios se resume en la tabla siguiente:

Elemento		Precio (€)
<b>Interruptor de carga</b>		38'28
<b>Interruptor automático</b>	Circuito de maniobra	46'93
	Circuito de potencia	97'74
<b>Interruptor diferencial</b>	Circuito de maniobra	152'02
	Circuito de potencia	151'65
<b>Variador</b>		731
<b>Cable monofásico (4m)</b>		39'46
<b>Cable trifásico (2m)</b>		8'3

Tabla 12. Precios planta potencia

- **Instrumentación**

Solo es necesario comprar los anemómetros de hilo caliente que tiene un precio unitario de 407'10 €. Por lo que la compra total de instrumentación sube a 814'20 €.

- Coste total

En la tabla siguiente podemos ver un resumen de que cuesta cada elemento, y en el caso de que se pida más de uno, el precio total del pedido.

Grupo	Coste (€)
Fabricación	519'95
Planta potencia	1.868
Instalación eléctrica	1.265'38
Instrumentación	814'20
<b>COSTE TOTAL</b>	<b>4.467'53</b>

Tabla 13. Costes totales

A continuación vemos un gráfico para poder hacernos una idea de la repercusión que tiene cada área en el coste final. Podemos comprobar que la planta potencia es la que requiere mayor esfuerzo económico, seguida muy de cerca de la instalación eléctrica.

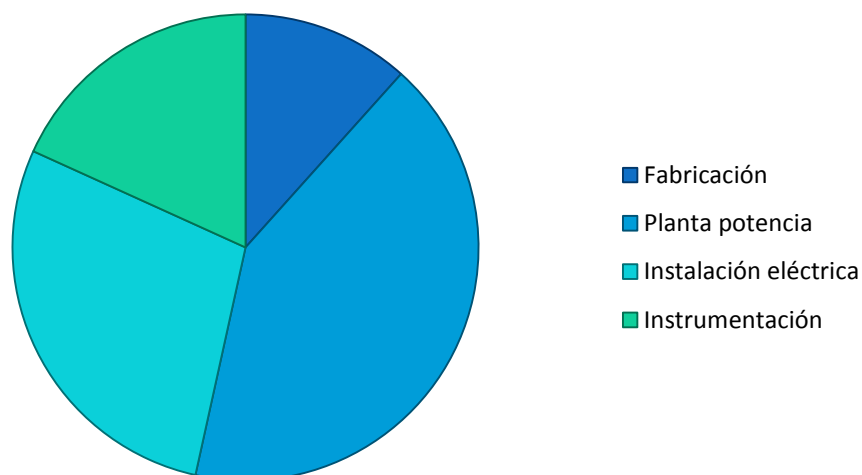


Figura 31. Gráfico comparación de costes

**8**

## **ESTUDIO DEL FLUJO EN LA CÁMARA DE ENSAYOS**



## 8. ESTUDIO DEL FLUJO EN LA CÁMARA DE ENSAYOS

En la maqueta simulada se han llevado a cabo distintos ensayos de capa límite para comparar los resultados obtenidos con los resultados del túnel ACLA-16 y comprobar si los estudios que se realizan en la maqueta se pueden dar por buenos. De este modo, se reducirían costes ya que primero se realiza un preestudio de la maqueta y, si el proyecto trasciende, se adapta al túnel aerodinámico real. Pero en este proyecto se quiere estudiar si con los datos obtenidos con un programa de análisis de la dinámica computacional del flujo (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) se puede hacer una simulación de la maqueta y obtener buenos resultados.

Por ello se simulan en el programa Fluent distintas configuraciones de categoría de terreno con la rugosidad, para poder comparar los resultados obtenidos con los resultados de la simulación con la maqueta. El caso es que actualmente aún se están realizando ensayos con la maqueta y solo hay disponibles los datos de algunas de las configuraciones. A continuación tenemos una tabla donde se nos muestran (Tabla 14).

Configuración	Rugosidad	Triángulos	Resultados maqueta	Resultados Fluent
1	-	-	X	X
2	$R_1$	-		X
3	$R_2$	-		X
4	$R_3$	-		X
5	$R_4$	-		X
6	-	$T_1$	X	X
7	-	$T_2$	X	X
8	-	$T_3$		X
9	-	$T_4$		X
10	$R_1$	$T_3$	X	X
11	$R_2$	$T_3$	X	X
12	$R_3$	$T_4$	X	X
13	$R_4$	$T_4$	X	X

Tabla 14. Categoría de terreno y rugosidad que se estudia en cada configuración

## 8.1 Configuración 1: Sin nada

No simula ningún caso real pero servirá para comprobar si el programa funciona y para comparar los resultados obtenidos en la maqueta. A continuación podemos ver las capas límites de las cinco secciones de control calculadas por el Fluent.

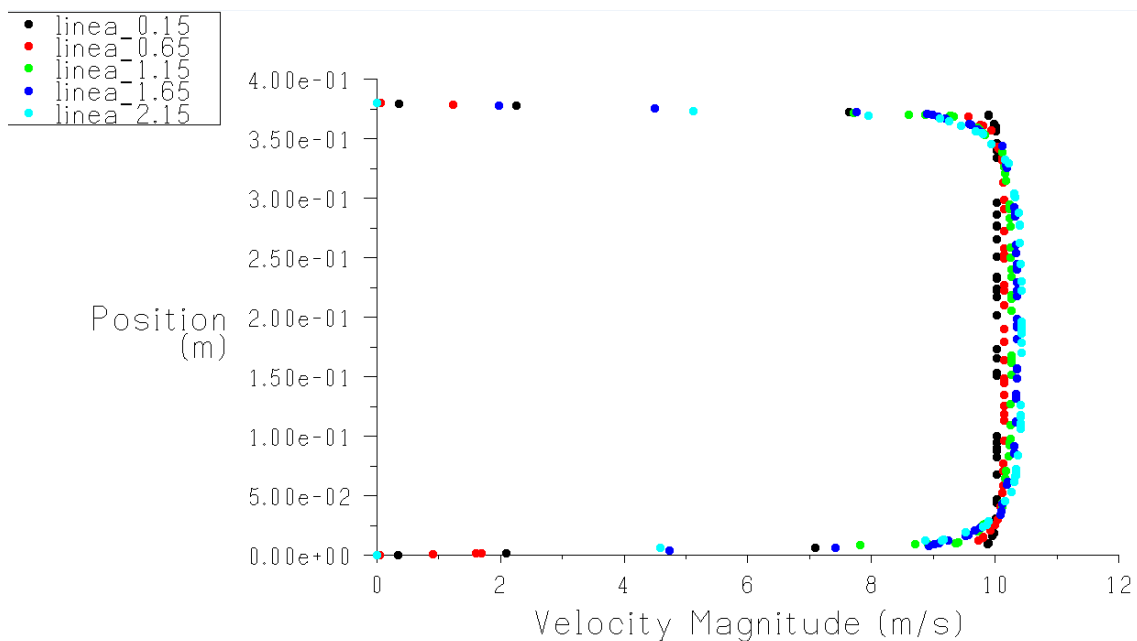


Figura 32. Configuración 1: Capas límites

Al ser el ensayo sin ningún tipo de rugosidad ni con ningún obstáculo para simular la capa límite, podemos comprobar como ésta casi no existe. Vemos que la velocidad a lo largo del túnel se mantiene constante a la velocidad de entrada (10 m/s) en la mayor parte de la sección. Solo en los bordes cercanos al techo y al suelo, y en las zonas de control más alejadas de la cámara de ensayos (líneas 1.65 y 2.15) podemos apreciar una capa límite muy pequeña, la cuál se debe a la turbulencia que se le ha dado al flujo. El suelo no interviene en éste caso ya que es una simulación y se le ha dado rugosidad 0.

La siguiente figura nos muestra cuatro cortes horizontales del túnel de viento para ver como varía la velocidad respecto la altura. Empezando por el corte de arriba, pertenecen a las alturas de 0'02, 0'05, 0'10 y 0'19 metros, respectivamente, y el sentido del flujo es de izquierda a derecha. A lo largo del proyecto se sigue utilizando la misma configuración. Se comprueba que la capa límite solo tiene importancia a distancias muy cercanas a las paredes ya que es el único plano donde podemos ver que la velocidad disminuye por debajo de 10 m/s.

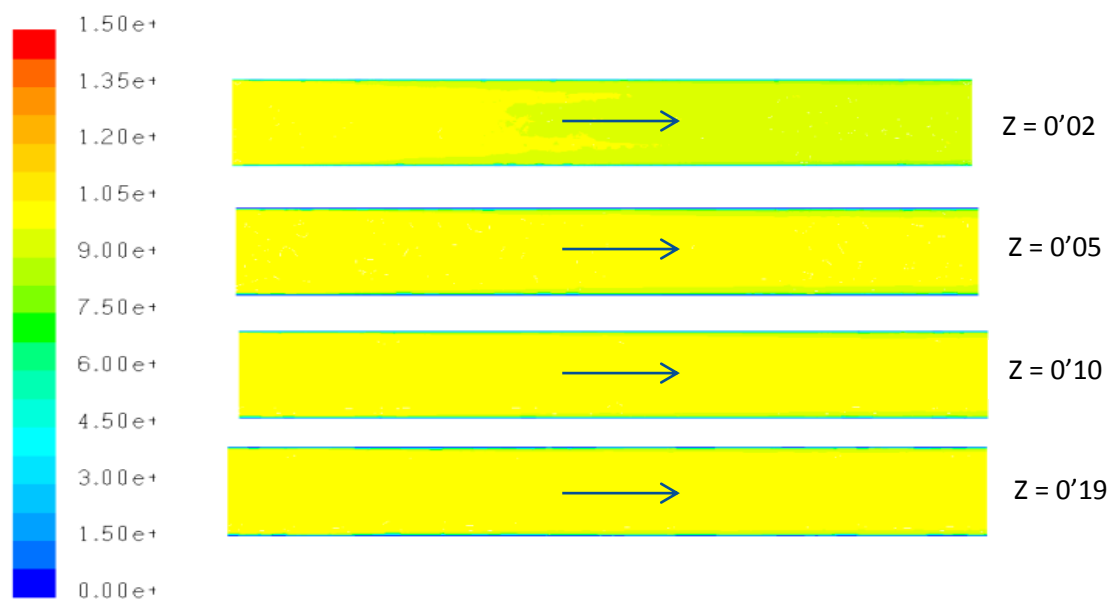


Figura 33. Configuración 1: Planos horizontales

Para entender mejor el comportamiento del fluido en el interior del túnel también se representan las cinco secciones transversales de medida. De izquierda a derecha y de arriba abajo se representan las distancias respecto a la sección de entrada del túnel a 0'15, 0'65, 1'15, 1'65 y 2'15 metros respectivamente. Esta figura reitera otra vez que la única zona del flujo que se ve afectada, y por tanto donde aparece una capa límite muy pequeña, es la zona que está en contacto con las paredes.

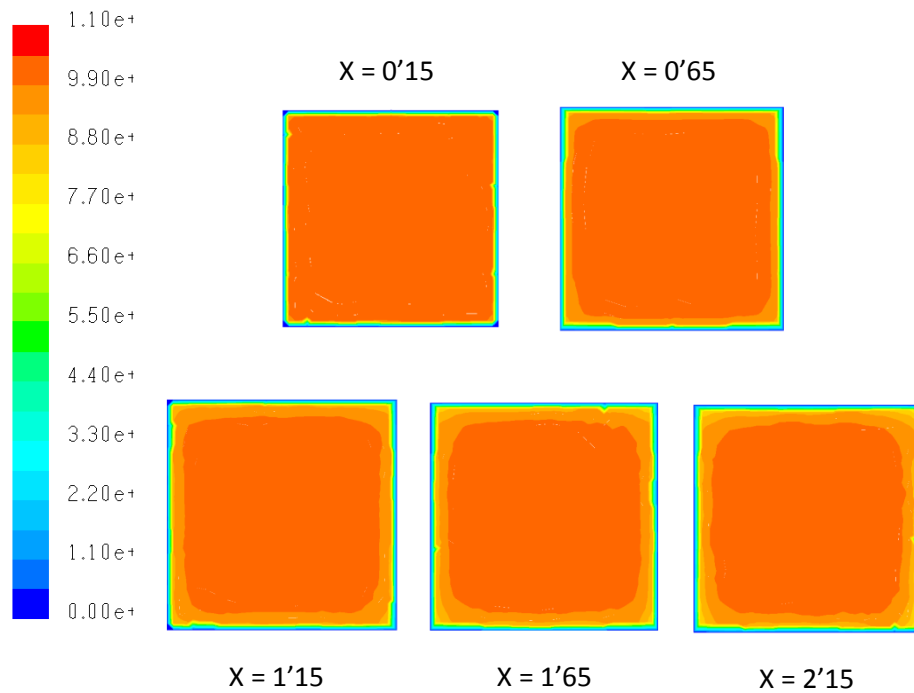
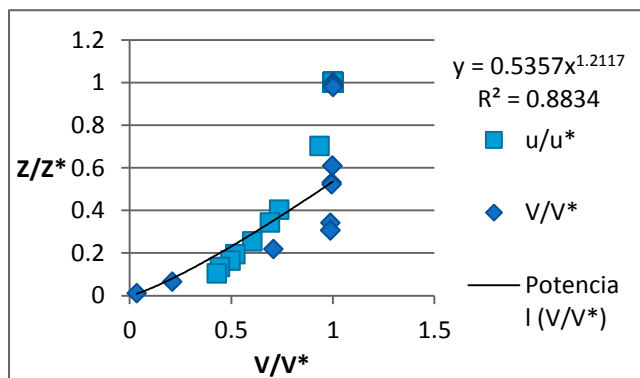


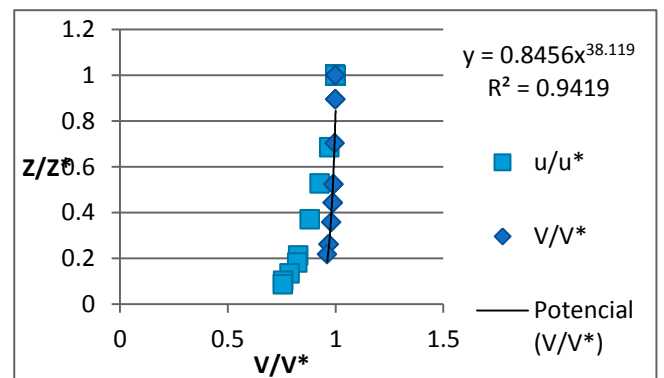
Figura 34. Configuración 1: Secciones transversales

Para poder comparar los resultados obtenidos en la simulación con el Fluent y los resultados medidos en la maqueta tenemos que adimensionalizar los datos. En ambos casos, se ha adimensionalizado por la misma altura así que podremos compararlos con facilidad en las tablas siguientes. Mencionar, que cada una de las tablas representa el valor de la velocidad adimensionalizada respecto a una misma altura, dónde los rombos azul marino son los resultados que nos proporciona Fluent, los cuadrados de azul turquesa son los obtenidos en el ensayo con la maqueta y la línea negra es la curva potencial teórica que tendría que seguir el flujo.

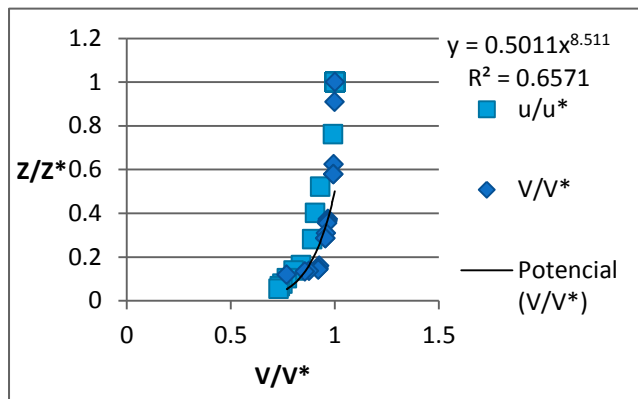
Línea\_0.15



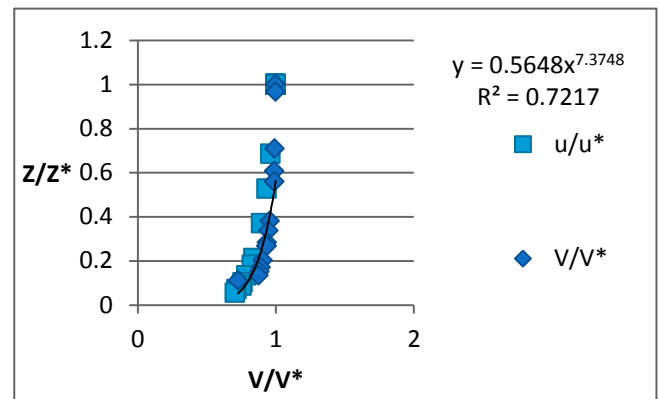
Línea\_0.65



Línea\_1.15



Línea\_1.65



Línea\_2.15

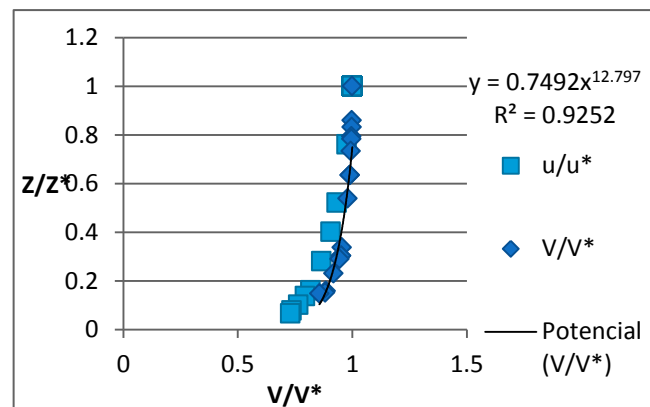


Figura 35. Configuración 1: Comparación de resultados

En las gráficas observamos como las dos primeras gráficas (línea\_0.15 y 0.65) no se parecen demasiado ni al caso real ni a la simulación realizada. Esto puede ser consecuencia de no haber introducido un valor de rugosidad al suelo de la simulación con Fluent y considerarla lisa, ya que tanto en la realidad como en la maqueta éste valor nunca será cero. En cambio, en las otras tres secciones de medida, las curvas reflejan valores más similares. Para compararlas mejor, analizaremos  $\alpha$  (ver 2.3.1) que sirve para determinar el tipo de terreno y se calcula como el inverso del exponente de la función “y”, obtenida en las gráficas adimensionalizadas.

$\alpha$	Línea_0.15	Línea_0.65	Línea_1.15	Línea_1.65	Línea_2.15
Fluent	0.33605538	0.02623364	0.11749501	0.1355969	0.07814331
Maqueta	0.383	0.119	0.110	0.119	0.116

Tabla 15. Configuración 1: Comparación de alpha

Para analizar si estos resultados son buenos o no, tenemos que mirar la Tabla 3, donde vienen recogidos los rangos de alpha para cada tipo de terreno. Comprobamos que hay dos rugosidades que son muy dispares, las pertenecientes a las secciones de control de 0.65 y 2.15, y aunque en las gráficas parezcan ser similares, realmente están representando un perfil de velocidades de distintos tipos de terreno.

## 8.2 Configuración 2: $R_1$

Este caso simula una rugosidad de CAT III a escala 1:50, es decir de bloques grandes. Como podemos ver en la siguiente figura, la capa límite se va desarrollando a lo largo del túnel, pues la línea de la sección de control 0.15 no tiene la forma característica del perfil de velocidades, pero si observamos las demás en orden creciente, vemos que el perfil de velocidades se va definiendo, hasta desarrollarse como una curva potencial. Además, las paredes tienen una gran influencia en el flujo, sobretodo el techo, ya que provoca el desprendimiento de la capa límite.

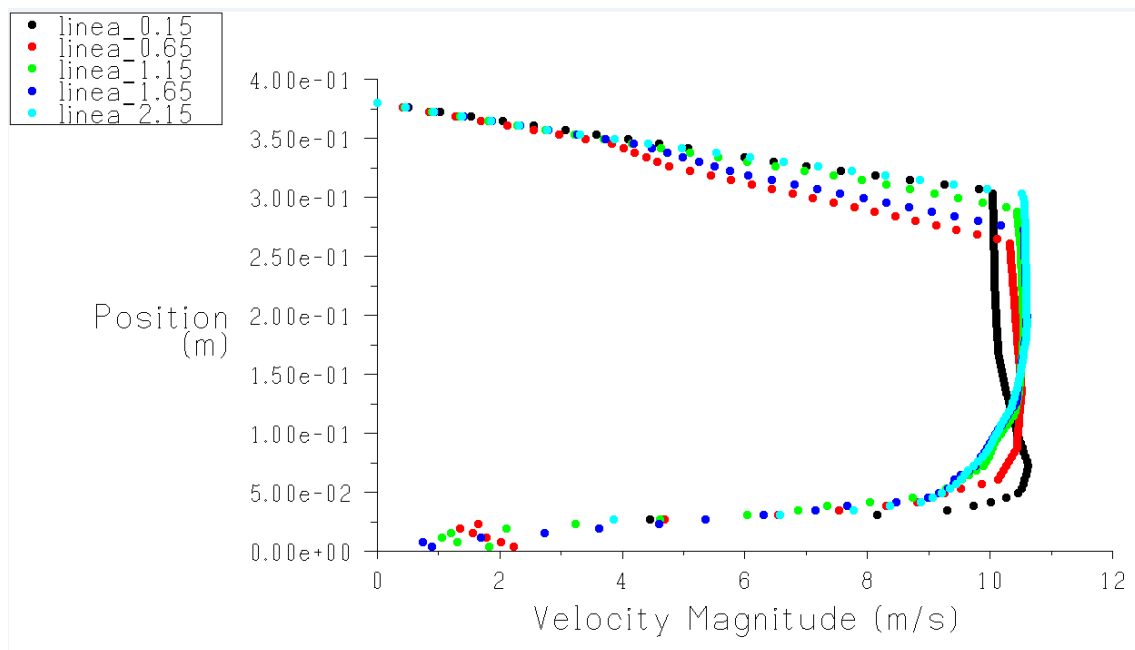


Figura 36. Configuración 2: Capas límites

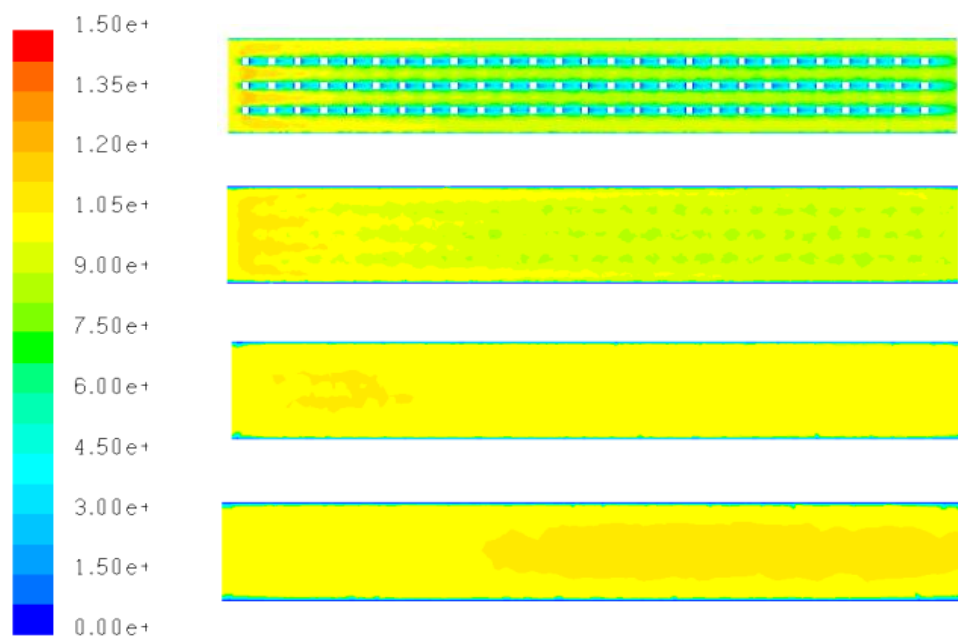


Figura 37. Configuración 2: Planos horizontales

La presencia de los bloques impide al flujo desplazarse según líneas de corriente rectas y paralelas al túnel. Por ello, en el plano inferior, donde vemos representados los bloques (plano 0.02), la primera fila de éstos hace que la velocidad aumente ya que

tiene que menos espacio. Además, detrás de cada bloque hay una zona dónde la velocidad alcanza valor cero. También se puede apreciar que los bloques al principio dividen el flujo en cuatro chorros, pero a lo largo del túnel la velocidad se va homogenizado lateralmente, hecho que provoca que al final del túnel del plano 0.05 se vea todo de color verde (9 m/s).

En cambio si nos fijamos en alzado, vemos que se crean capas con distintas velocidades. La que está más cerca del suelo es la más lenta ya que tiene que salvar más obstáculos, y debido a la turbulencia que ésta crea, la capa adyacente también se ve afectada. Así que el flujo que antes pasaba por abajo ahora se concentra más hacia el medio, donde no encuentra obstáculos y avanza a velocidades superiores a la inicial.

Esto también se puede comprobar mirando las secciones transversales mostradas en la figura 38, dónde se distingue perfectamente que al principio del túnel, el flujo con mayor velocidad es el que está en contacto con los primeros bloques, pero al ser una rugosidad continua, el flujo se desplaza hacia arriba porque encuentra menos resistencia al desplazarse. Al igual que las paredes del techo, en la zona con rugosidad el flujo presenta velocidades iguales a cero y aumenta hacia el centro. Los cuadrados blancos son bloques que han sido cortados por el plano de estudio y por eso no presentan información de velocidad.

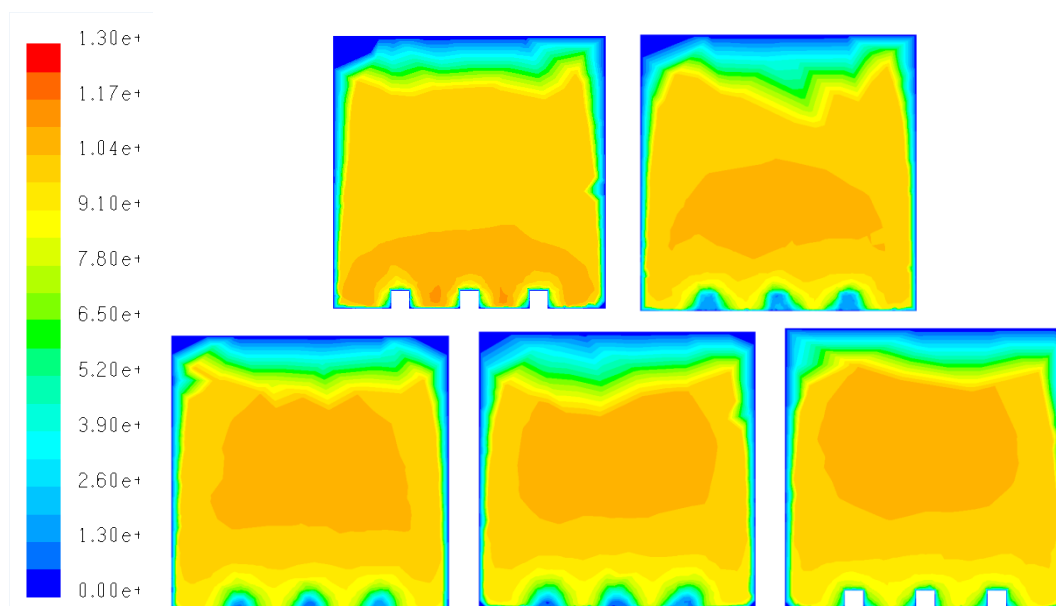


Figura 38. Configuración 2: Secciones transversales



### 8.3 Configuración 3: $R_2$

En esta configuración caracteriza la rugosidad del suelo que representa el terreno de categoría III a escala 1:200.

En el gráfico de la *Figura 39*, vemos el desarrollo de la capa límite a lo largo del túnel, pero no mediante líneas continuas. Esto se debe a que la malla hecha para realizar los cálculos es más grande en la parte superior que en la inferior, de manera que tenemos información más exhaustiva de la zona que nos interesa (inferior) en detrimento de la información en la parte superior, para no a colapsar el ordenador. Pero igualmente, se aprecia el perfil de velocidades típico de la capa límite atmosférica.

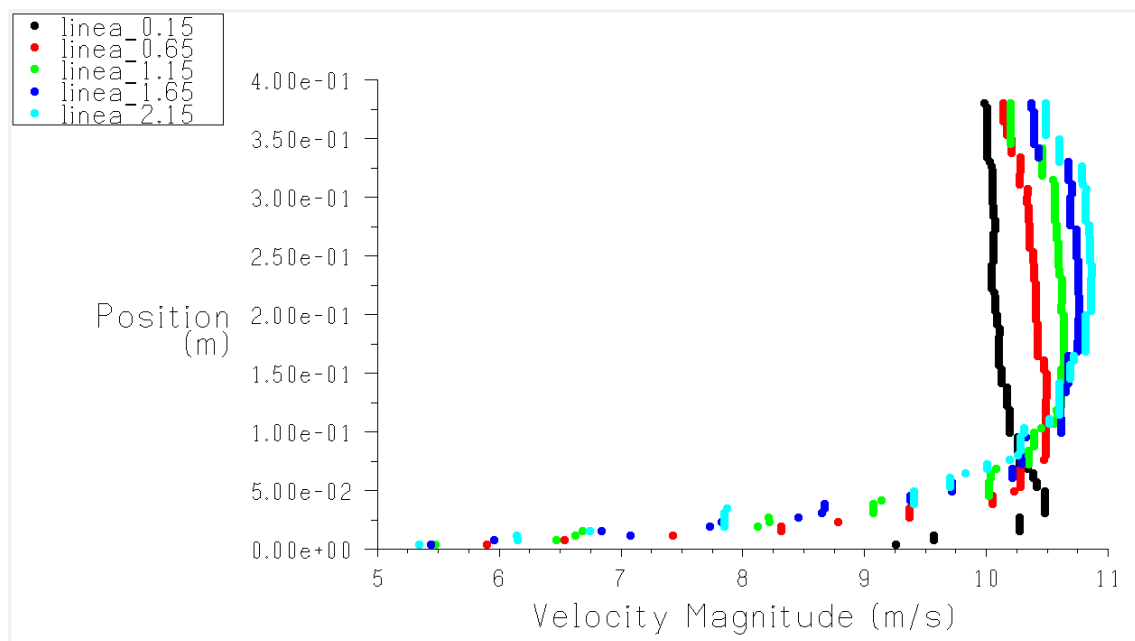


Figura 39. Configuración 3: Capas límites

En el corte horizontal a 0.02m de altura (ver *Figura 40*), podemos apreciar como los cubos dividen el flujo generando chorros de mayor velocidad, que la dada inicialmente, entre ellos. Además, en el plano longitudinal, al haber una rugosidad continua el flujo

tiene dificultades para avanzar entre ellos por lo que su velocidad se reduce (color verde) y a la larga resulta crear el efecto de una pared. Asimismo la perturbación generada por la rugosidad también se nota en la sección transversal (ver *Figura 41*), ya que al principio las mayores velocidades se encuentran justo encima de la rugosidad, y a medida que se desarrolla la capa límite se desplaza hacia arriba ya que es donde puede desplazarse con mayor facilidad (menos obstáculos y menos rugosidad).

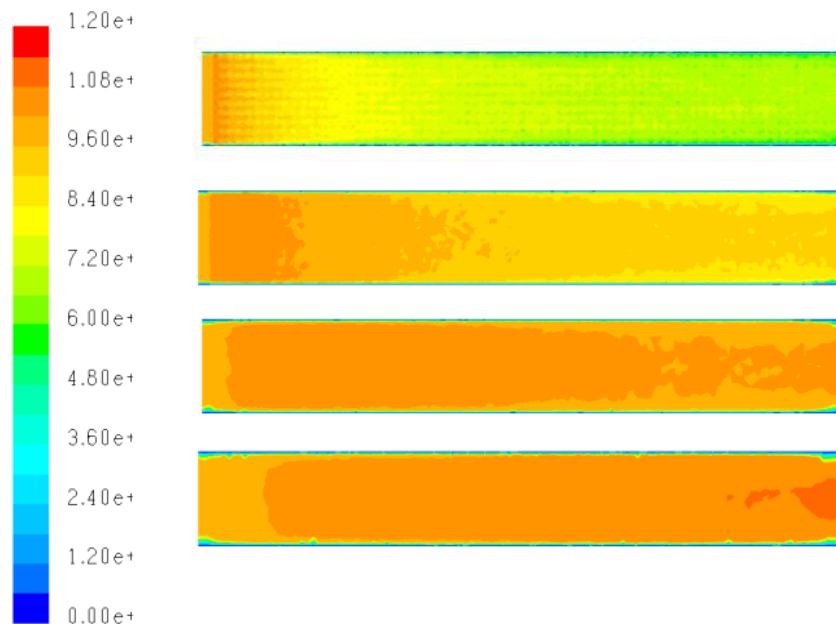


Figura 40. Configuración 3: Planos horizontales

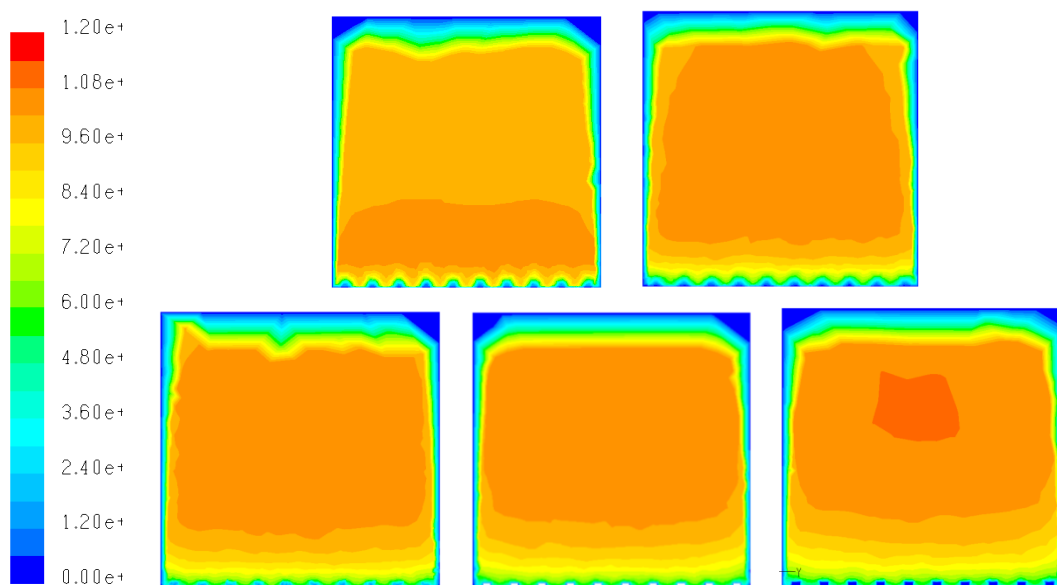


Figura 41. Configuración 3: Planos transversales

## 8.4 Configuración 4: R<sub>3</sub>

Este caso representa el terreno de categoría IV a escala 1:50, es decir, el suelo está recubierto de bloques para simular la rugosidad característica. Como ya hemos visto en los casos anteriores, el perfil de velocidades en la primera sección de control está notando los primeros efectos de la rugosidad (ver *Figura 42*). En principio todo el flujo de aire venía uniforme y paralelo a 10m/s, por ello la parte superior es continua en ese valor. En cambio, la parte inferior de la línea\_0.15 está perturbada por los cubos y por ello sale representada una zona con velocidad de flujo superior a la de entrada. A medida que el flujo avanza por la cámara, éste se estabiliza y se forma el perfil de velocidades de la capa límite (ver línea\_2.15).

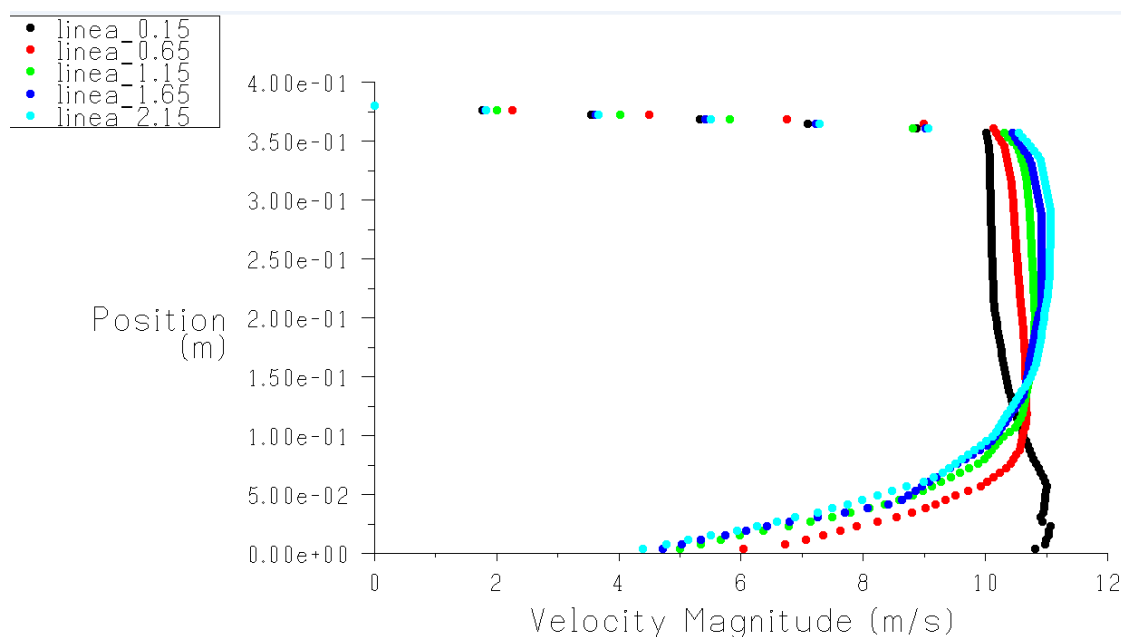


Figura 42. Configuración 4: Capas límites

A continuación podemos ver los planos horizontales y las secciones transversales para entender mejor lo que se ha explicado arriba. En el caso de la *Figura 43*, vemos que a causa de los bloques esta zona se caracteriza por ser de bajas velocidades y que repercute directamente en la zona media de la sección donde a su vez el flujo se mueve más rápido.

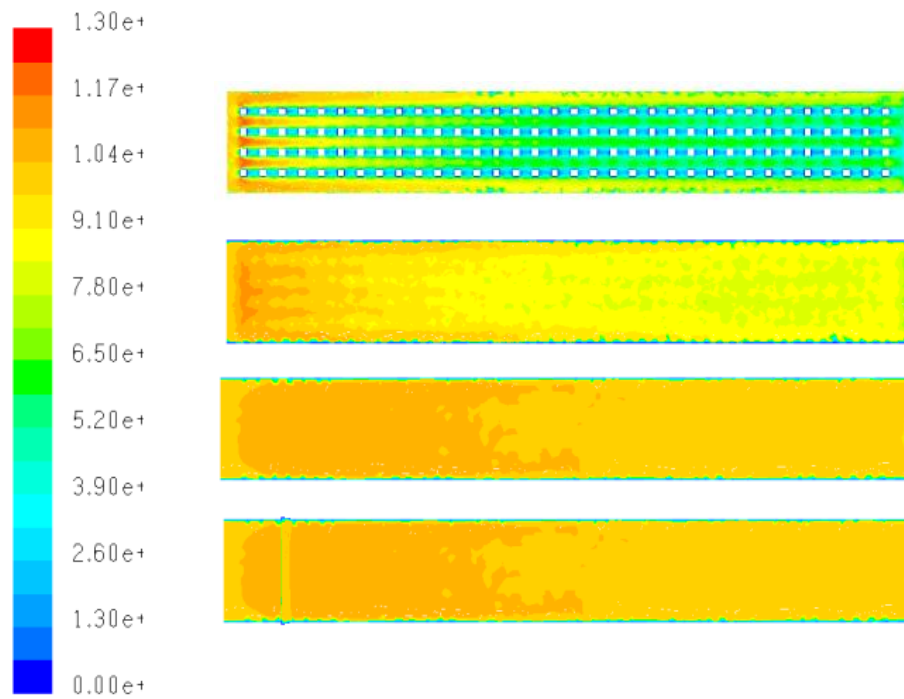


Figura 43. Configuración 4: Planos horizontales

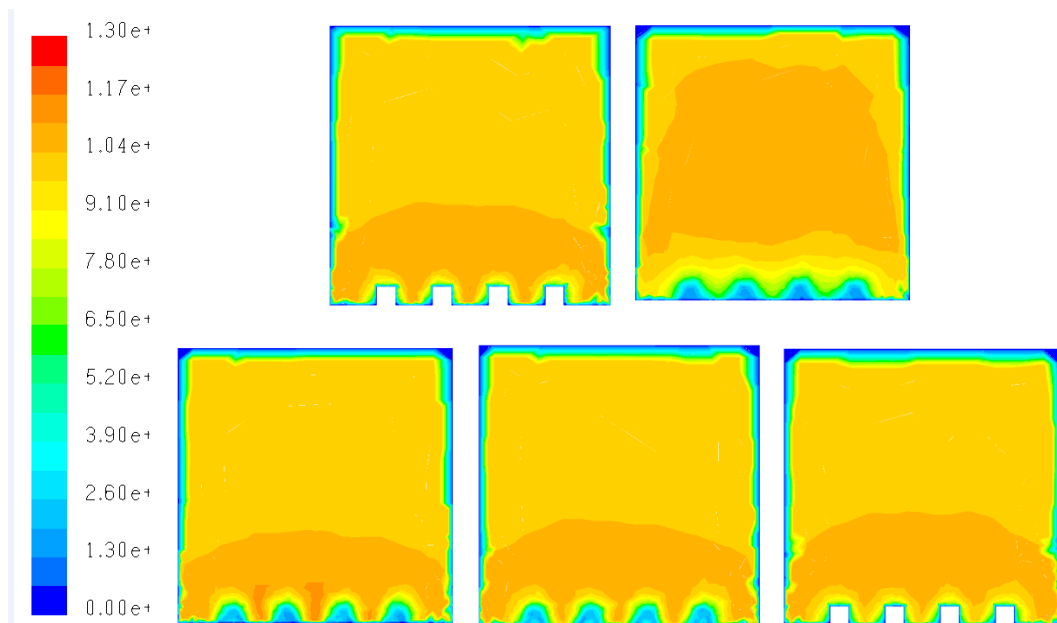


Figura 44. Configuración 4: Secciones transversales

## 8.5 Configuración 5: $R_4$

Este ensayo se caracteriza por representar el terreno de categoría IV a escala 1:200. Vemos como se desarrolla la capa límite a lo largo del túnel, y como en las zonas cercanas al suelo y al techo, la velocidad va decreciendo, la primera debido a la rugosidad superficial y la segunda debido al material del propio techo.

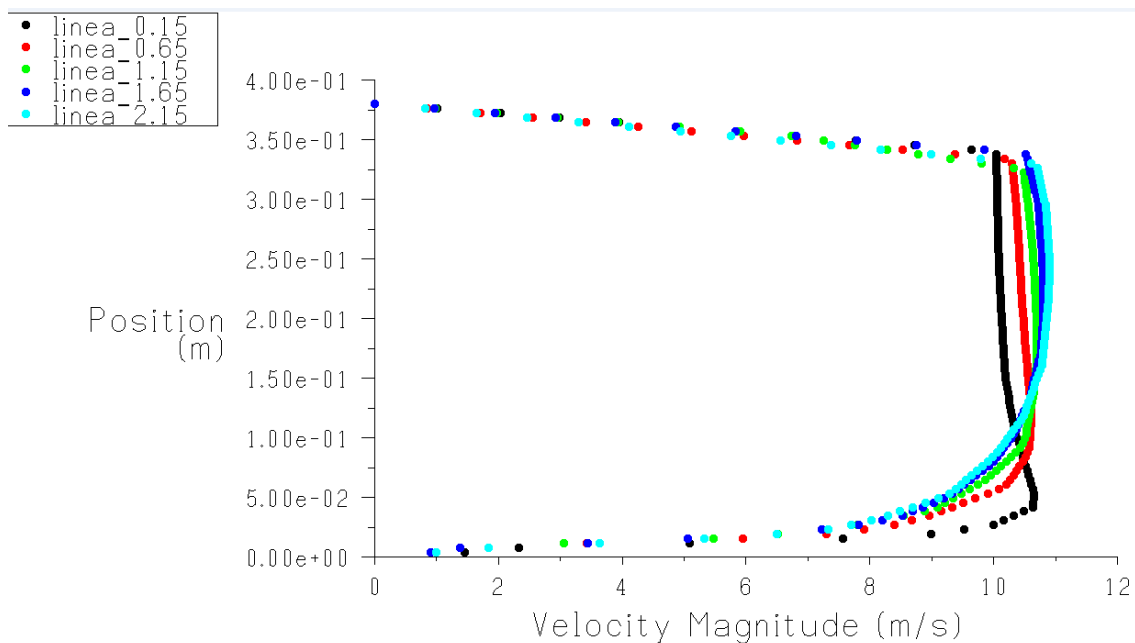


Figura 45. Configuración 5: Capas límites

A continuación vemos las representaciones de los planos horizontales y las secciones transversales, que al igual que en los otros casos, la rugosidad crea una perturbación en el flujo haciendo que éste vaya más despacio en las capas bajas de la cámara y en la zona que queda despejada de obstáculos hace que el flujo vaya más rápido.

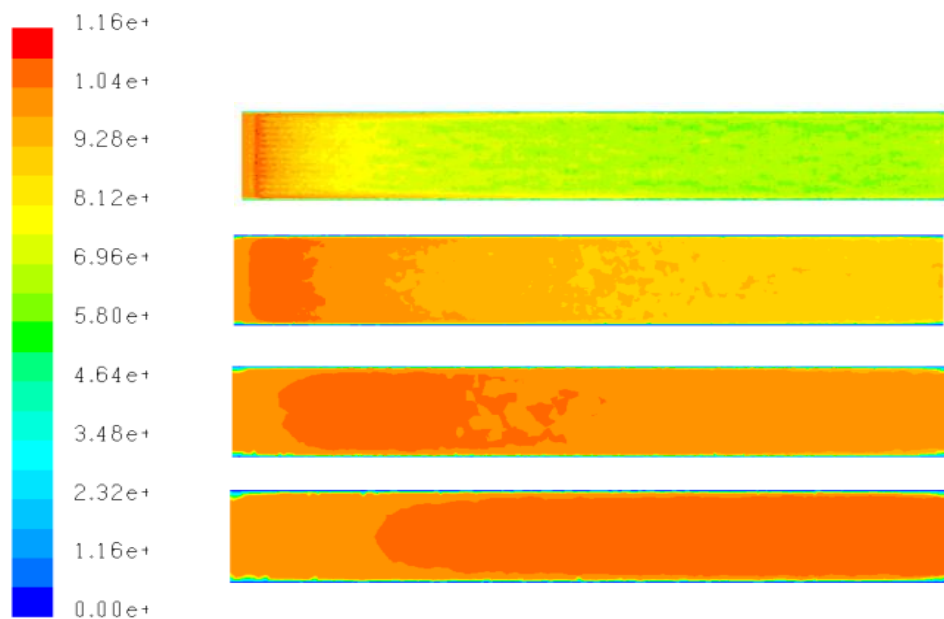


Figura 46. Configuración 5: Planos horizontales

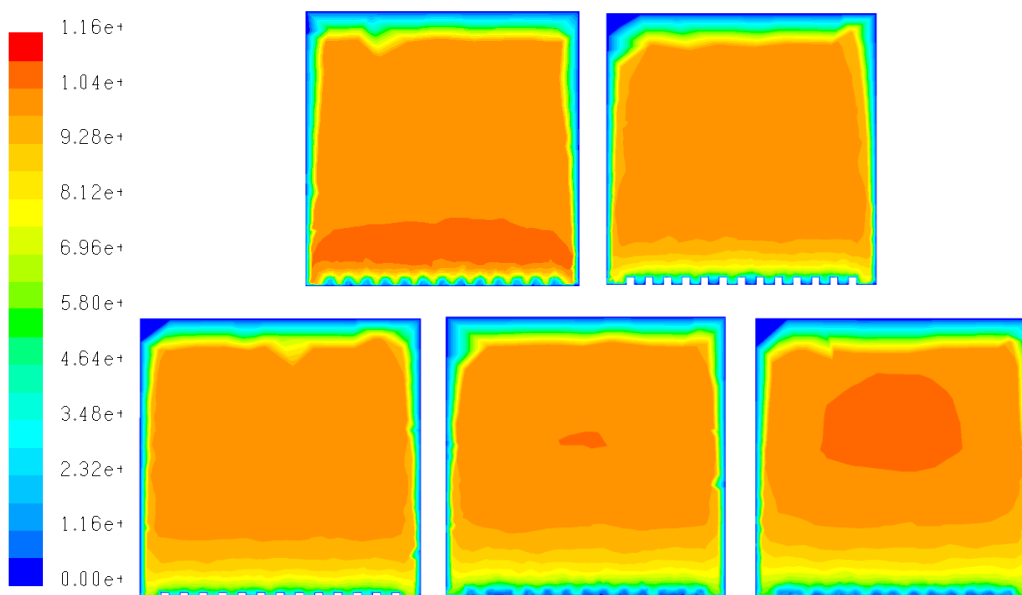


Figura 47. Configuración 5: Secciones transversales

## 8.6 Configuración 6: $T_1$

Recordemos que esta configuración se caracteriza por tener tres triángulos que obstaculizan la circulación del flujo para crear vórtices y recrear la capa límite atmosférica. Los triángulos son de tipo I por lo que son los mas estrechos y alargados que vamos a ensayar.

Si nos fijamos en la figura siguiente donde están representados los perfiles de velocidades de cada sección de control, vemos que las velocidades a 0.15 m tienen un valor igual a cero hasta una altura cerca de los 0.295 m, puesto que allí es dónde se encuentran los triángulos. Una vez más comprobamos que la capa límite se va desarrollando a lo largo del túnel y que no se desprende tan rápidamente del techo como en los estudios anteriores.

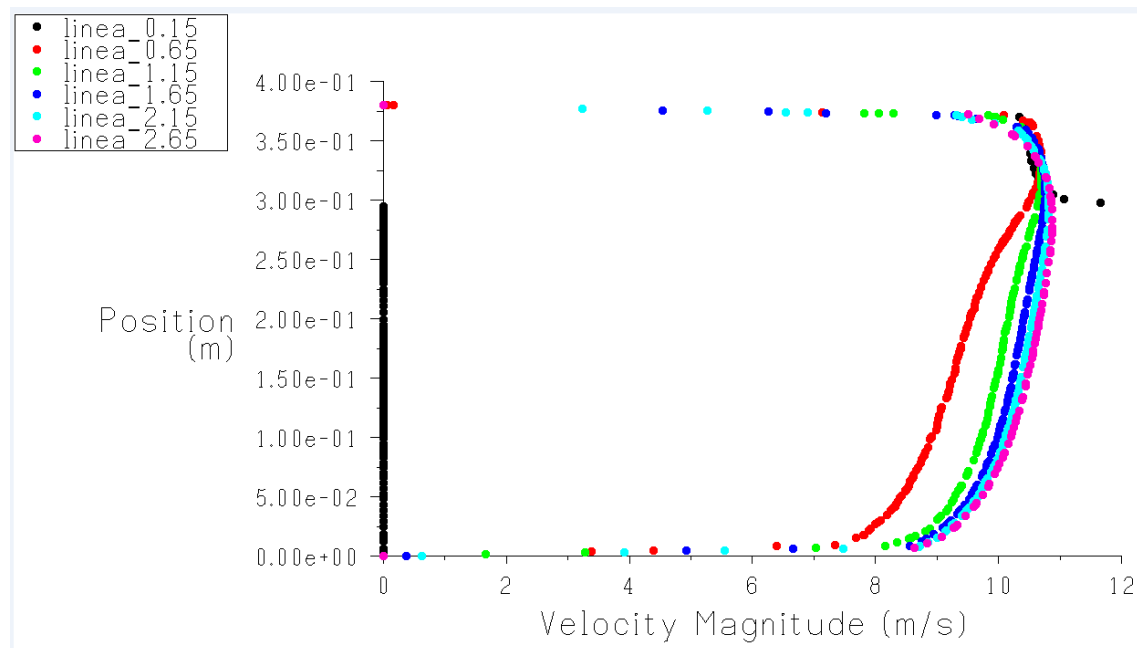


Figura 48. Configuración 6: Capas límites

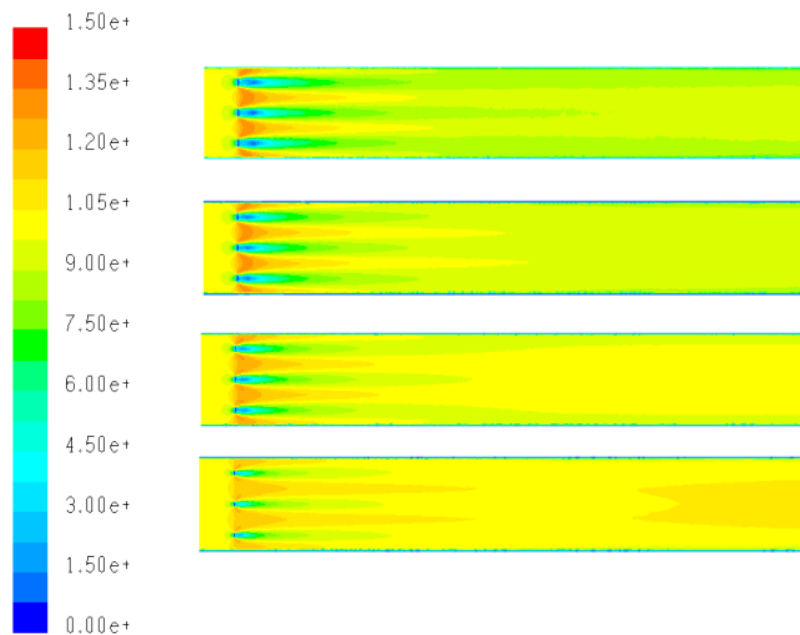


Figura 49. Configuración 6: Planos horizontales

Mirando la *Figura 49* vemos que la velocidad se distribuye verticalmente de la misma manera que en los casos donde solo hay rugosidad, es decir, que por el suelo va más lenta que por las capas superiores. Además, este obstáculo crea distintos chorros de aire, pero como está ubicada al principio de la cámara de ensayos, estos tienden a estabilizarse, es decir, se homogeniza la velocidad para una misma altura.

Analizando el flujo transversalmente (ver *Figura 50*) vemos que al principio las diferencias de velocidad en capas adyacentes son muy pronunciadas y siguen la forma de perturbación del obstáculo, pero a medida que el flujo se aleja de las agujas se va normalizando hasta tener una zona central a más velocidad, que va disminuyendo hasta llegar a las paredes donde se considera que el flujo no se mueve.



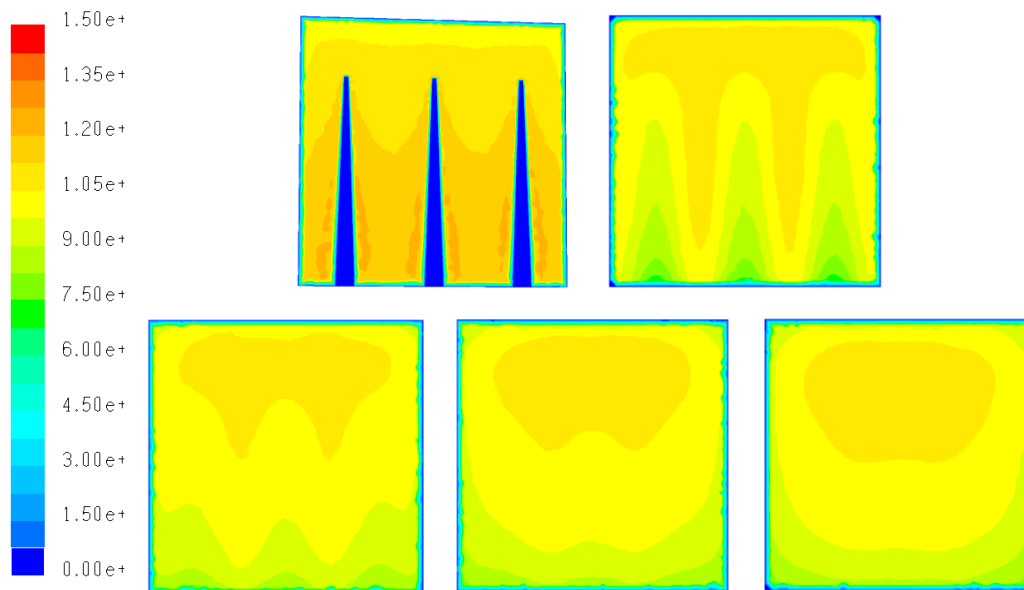
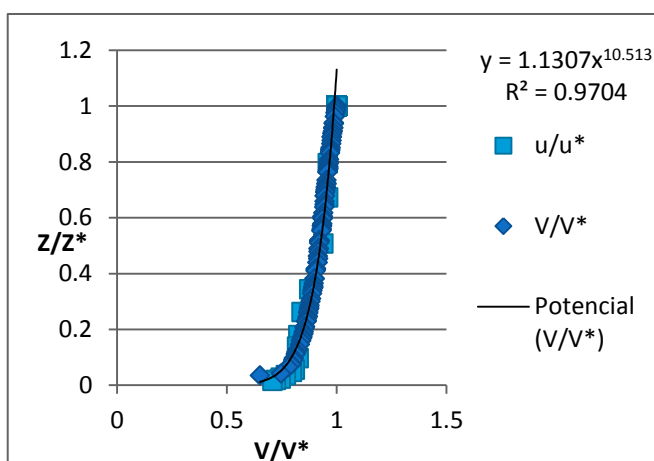


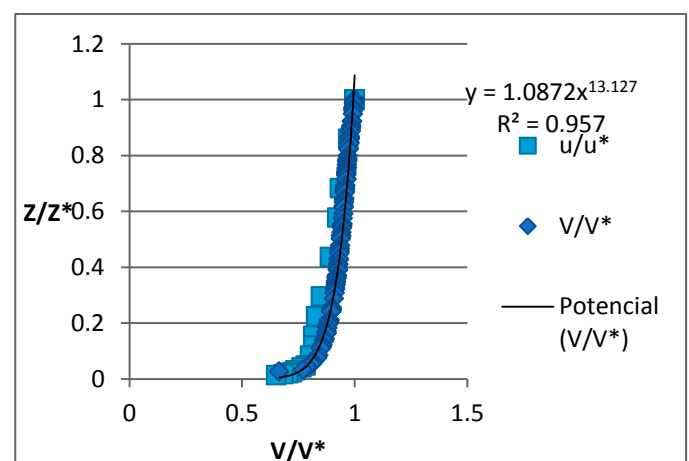
Figura 50. Configuración 6: Planos transversales

A continuación se muestran los resultados del perfil adimensionado de velocidades para poder compararlo con los resultados experimentales obtenidos de la maqueta, y una tabla con los valores de alpha obtenidos. Esta vez, los resultados del plano 0.15 no se tienen en cuenta ya que es el sitio donde están las agujas, por lo que tenemos cuatro secciones de control.

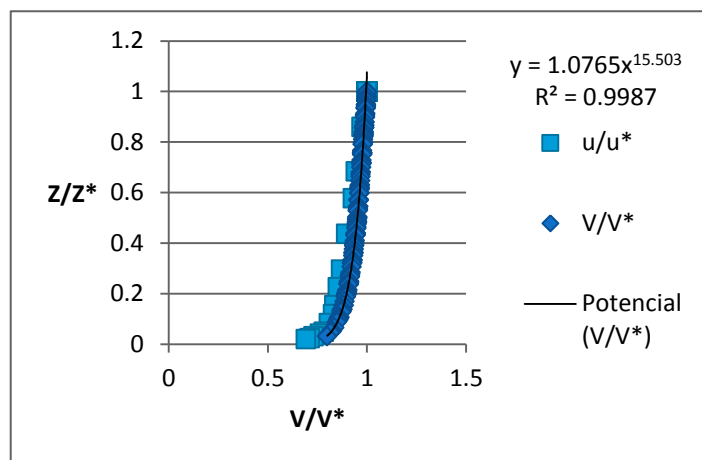
Linea\_0.65



Linea\_1.15



Linea\_1.65



Linea\_2.15

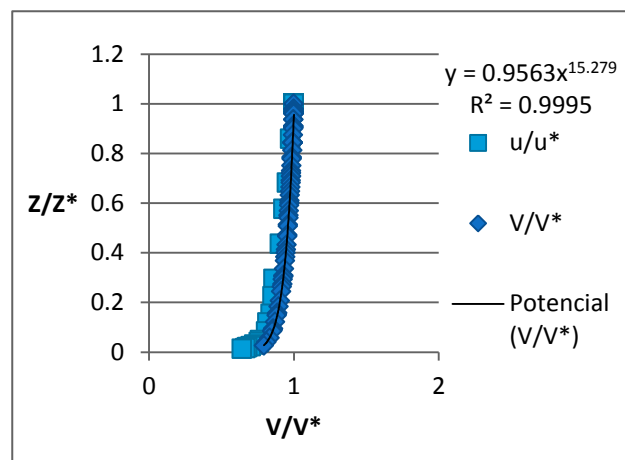


Figura 51. Configuración 6: comparación de resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.09512033	0.07617887	0.06450364	0.06544931
Maqueta	0.084	0.093	0.091	0.096

Tabla 16. Configuración 6: Comparación de alpha

Las gráficas son muy parecidas y en el caso de las secciones de 0.65 y 1.15 llegan a superponerse. En los otros dos casos divergen un poco a medida que se acercan al suelo y si comparamos sus alphas vemos que las obtenidas con el Fluent no pertenecen a ningún rango que caracterice un tipo de terreno. En cambio, las alphas de las dos primeras pertenecen al mismo tipo de terreno de categoría I, que es el que se está modelizando.

## 8.7 Configuración 7: $T_2$

Esta configuración se caracteriza por tener tres agujas de 0'29 metros de alzada, es decir son un poco más bajas y más anchas que el caso anterior. Como la sección de control a 0.15 m es donde ponemos las agujas ya no lo tendremos en cuenta para compararlo.

En este caso, vemos como el flujo perturbado tiende a ir más rápido por la parte superior produciendo un efecto de chorro (línea\_0.65, negra) pero que a lo largo del túnel se desarrolla sin ningún tipo de problema. Además, comentar que el techo ya no produce las pérdidas de velocidad que hemos ido viendo en los casos de rugosidad.

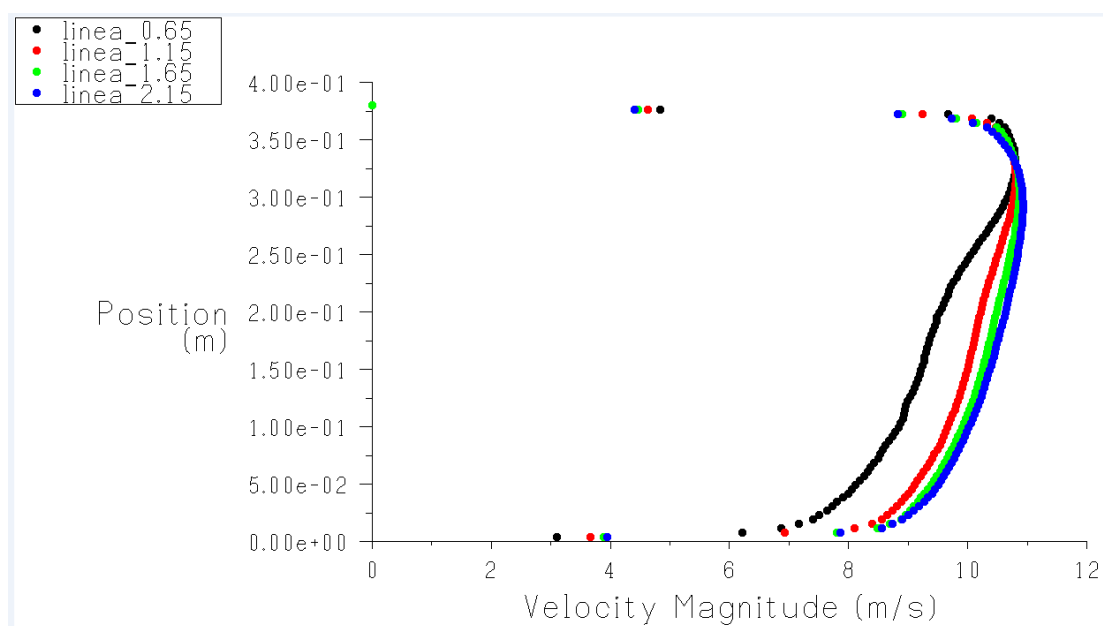


Figura 52. Configuración 7: Capas límites

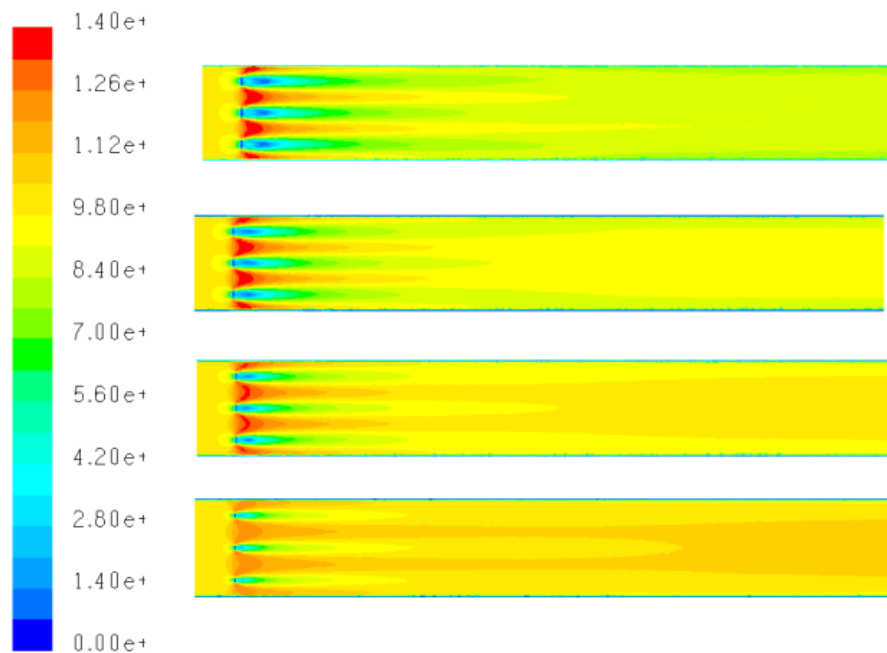


Figura 53. Configuración 7: Planos horizontales

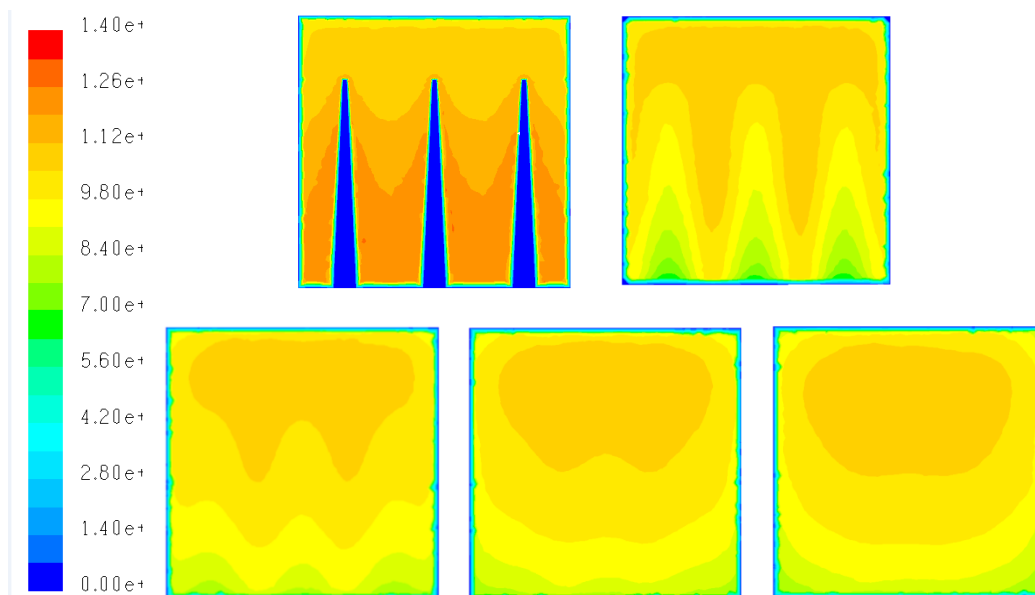
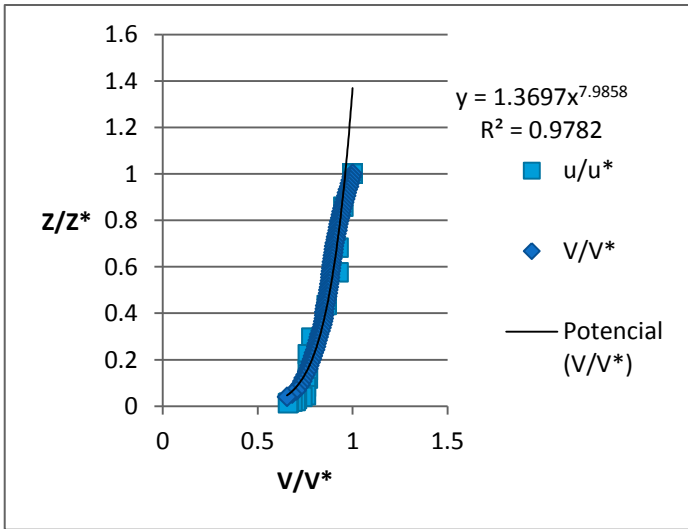


Figura 54. Configuración 7: Secciones transversales

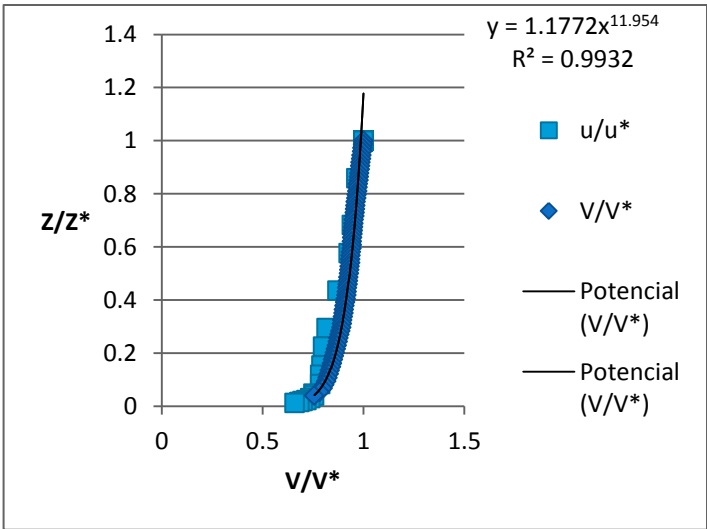
Tanto la distribución de velocidades horizontal como vertical sigue el mismo patrón que el anterior. Las capas más cercanas al suelo presentan velocidades menores que las de arriba y los chorros con altas velocidades causados por las agujas tienden a uniformarse a medida que el flujo avanza por la cámara de ensayos.

En las tablas siguientes vemos las tablas comparaciones de los resultados obtenidos con el Fluent, con los resultados experimentales de la maqueta. En general ambos resultados coinciden pero difieren un poco de la línea de potencia representada. Para compararlo mejor, analizamos alpha, y vemos que todos los resultados obtenidos en Fluent pertenecen al rango de triángulo tipo I, al igual que las alphas de la maqueta.

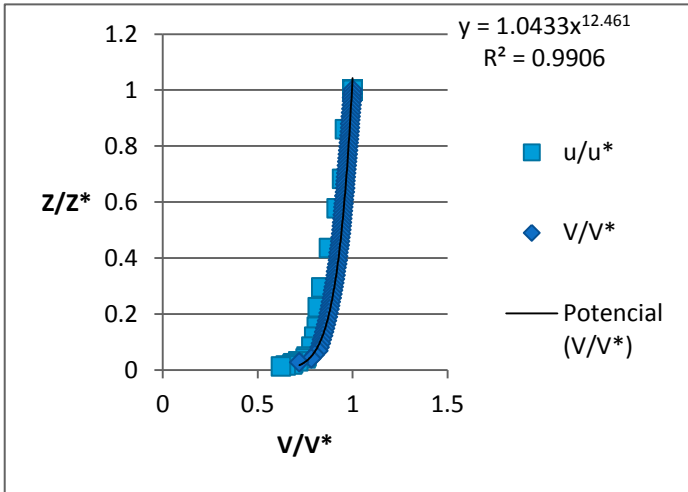
Linea\_0.65



Linea\_1.15



Linea\_1.65



Linea\_2.15

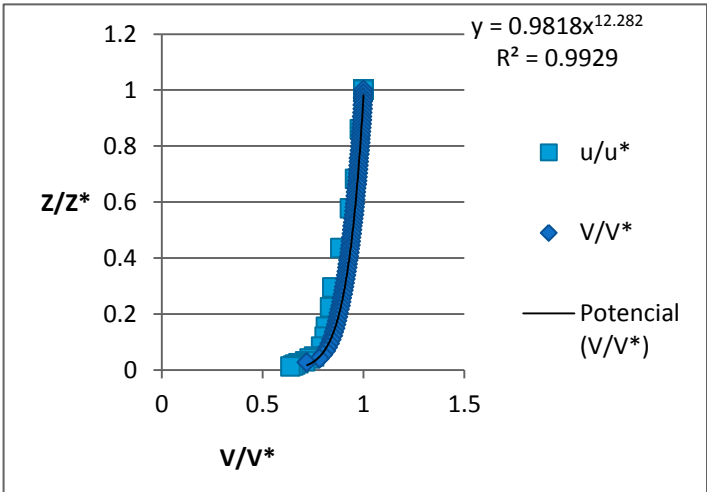


Figura 55. Configuración 7: Comparación de resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.12522227	0.08365401	0.08025038	0.08141996
Maqueta	0.107044	0.097846	0.102853	0.102853

Tabla 17. Configuración 7: Comparación de alpha

## 8.8 Configuración 8: $T_3$

Es el mismo concepto que los dos ensayos anteriores; tres agujas, esta vez, de 0'28m de altura que perturban el flujo de tal manera que se genera una simulación de capa límite, que se desarrolla a lo largo del túnel (ver *Figura 56*).

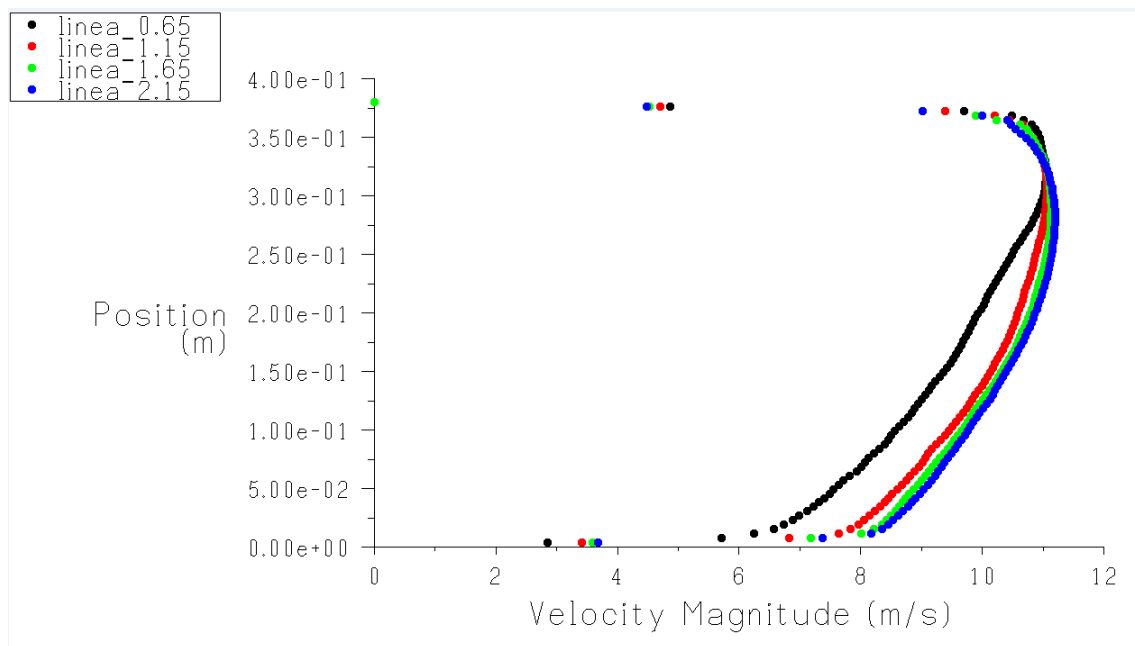


Figura 56. Configuración 8: Capas límites

Como las agujas son más anchas por su base generan chorros de alta velocidad, en esa zona concreta, y luego tienden a uniformarse otra vez. Podemos comprobarlo mirando la *Figura 57* donde al principio vemos mucho color rojo (chorros producidos por los obstáculos) y que luego se degrada hasta obtener un mismo tono de color, lo que significa que es una zona con la misma velocidad. También lo podemos interpretar mirando la *Figura 58* que, a medida que nos alejamos de la perturbación inicial, quedan menos repercusiones de las perturbaciones producidas. Seguramente si la cámara de ensayos fuese más larga acabaríamos viendo un flujo uniforme y estable, al igual que el flujo que veíamos en la configuración 1.

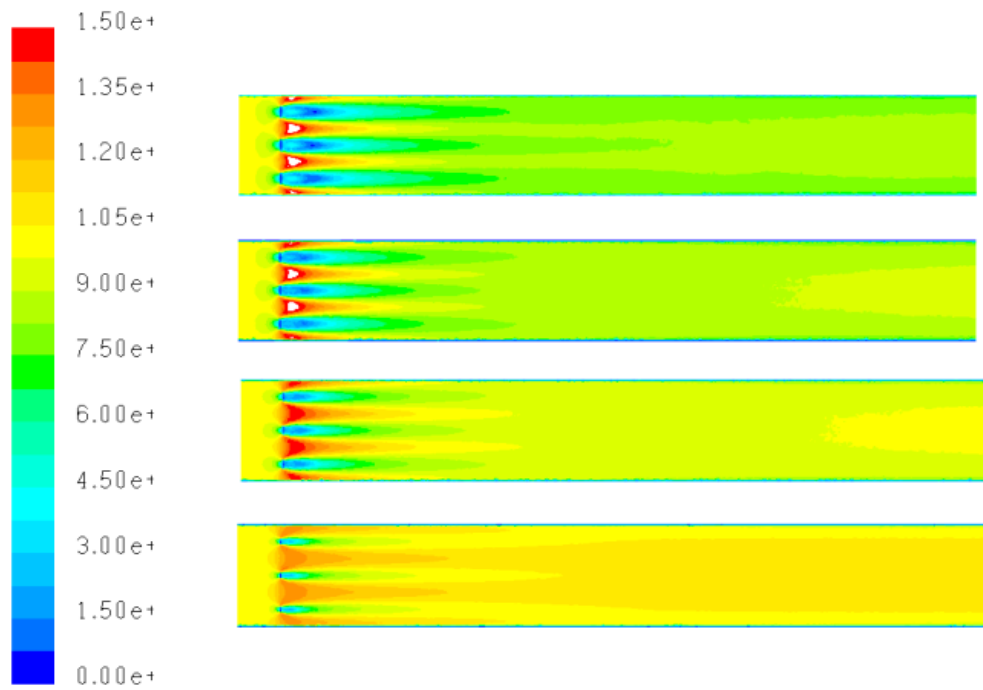


Figura 57. Configuración 8: Planos horizontales

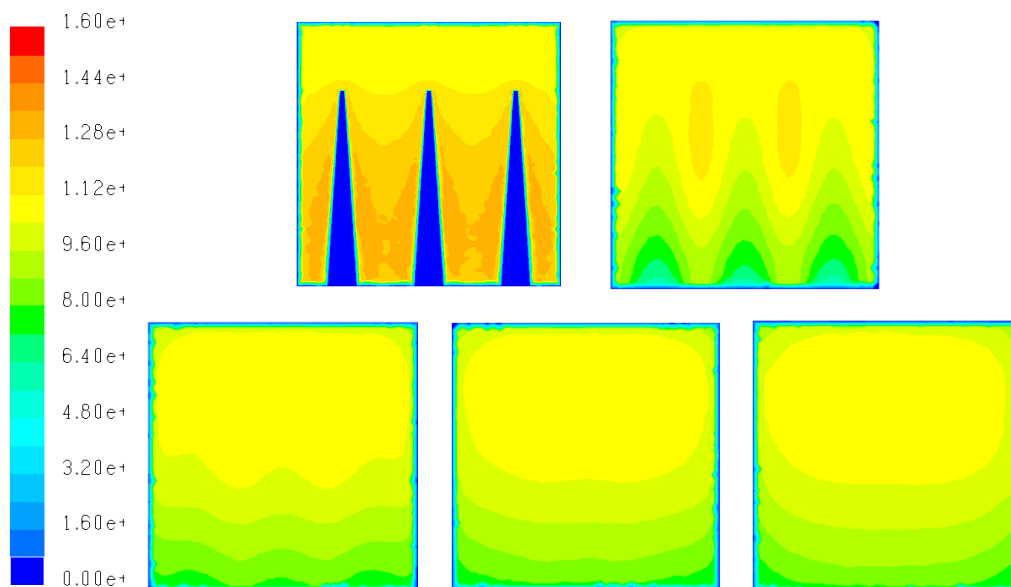


Figura 58. Configuración 8: Secciones transversales

## 8.9 Configuración 9: $T_4$

Este estudio se realiza sobre el último tipo de aguja que tenemos, la cual tiene una alzada de 0'27 m que al perturbar el flujo, genera la capa límite tal y como podemos ver a continuación (ver *Figura 59*).

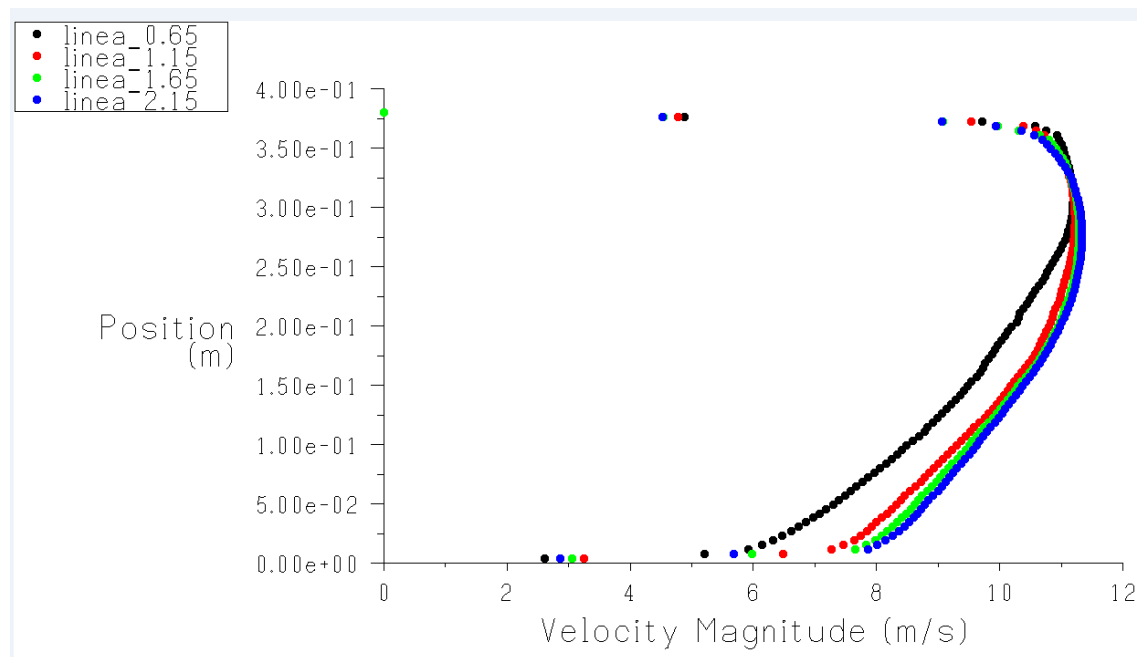


Figura 59. Configuración 9: Capas límites

El hecho de que la capa límite vuelva a perder velocidad y que no permanezca constante, es decir, que realice la curva hacia la izquierda después de haber alcanzado su máxima velocidad, se debe al techo. Si fuera aire libre no ocurriría tal cosa, y según hemos visto en teoría, permanecería asintótica al valor de velocidad libre del aire.

Si analizamos los planos horizontales, vemos que se repite la misma dinámica que en los otros casos de agujas. El flujo que proviene de la turbina y pasa por la rejilla y la honeycomb, se ve perturbado, y se crean chorros de alta velocidad ya que el espacio ha sido reducido. Además, justo detrás de las agujas se crean zonas de velocidad muy lenta con valores próximos a cero. La gran diferencia de velocidades entre ambos casos se va uniformizando a lo largo del túnel tanto longitudinalmente, como transversalmente. En este segundo caso se crea una zona de altas velocidades en la



parte superior de la cámara de ensayos, pues es donde ha encontrado menos obstáculos. En ambos casos, las zonas que están cerca de las paredes siguen teniendo velocidades muy pequeñas, incluso cero.

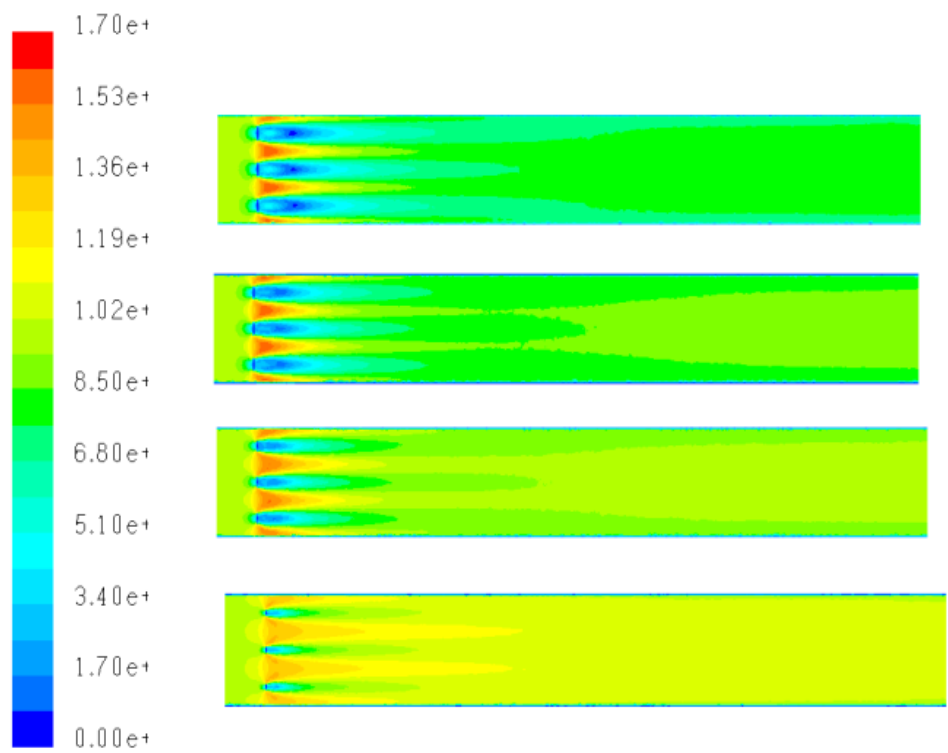


Figura 60. Configuración 9: Planos horizontales

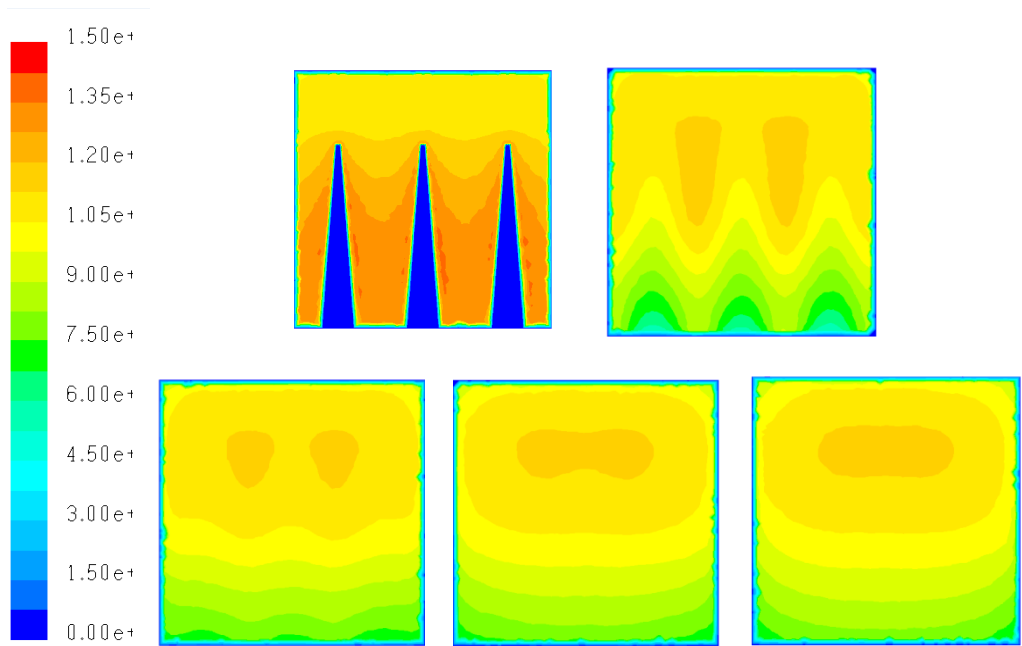


Figura 61. Configuración 9: Secciones transversales

## 8.10 Configuración 10: $R_1 T_3$

Esta configuración se caracteriza por tener unas agujas de tipo III y rugosidad que representa terreno de categoría III a escala 1:50. Si comparamos estas capas límites con las obtenidas en las configuraciones 6, 7, 8 y 9 (solo agujas), vemos que las velocidades cerca del suelo son mucho menores, debido a la introducción del elemento de simulación de rugosidad. En cambio si lo comparamos con las configuraciones 2, 3, 4 y 5 (solo rugosidad), vemos que las velocidades cerca del techo son mucho mayores, y ello se debe a las agujas, ya que propician que al flujo de aire le resulte mas fácil desplazarse por la parte superior (ver *Figura 62*).

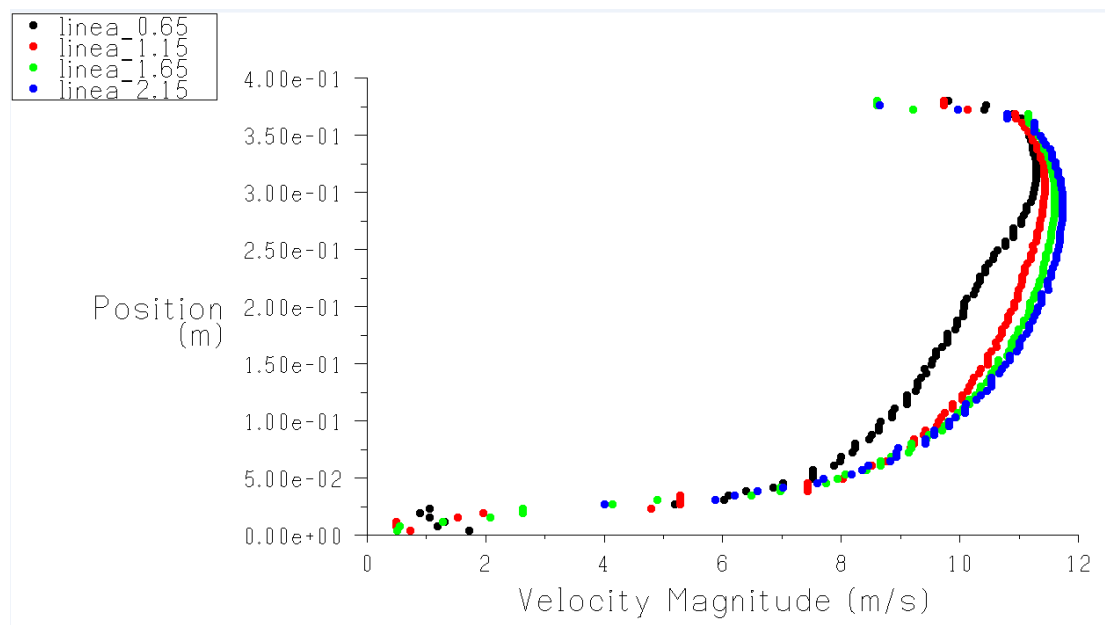


Figura 62. Configuración 10: Capas límites

A continuación vemos los planos horizontales de este ensayo, donde la parte inferior se caracteriza por tener velocidades muy pequeñas ya que la rugosidad simulada interfiere cada vez, haciendo que aparezcan zonas con velocidad casi nula.

Y debido a los triángulos, el flujo con las velocidades más altas se genera en la parte superior de la cámara de ensayos.

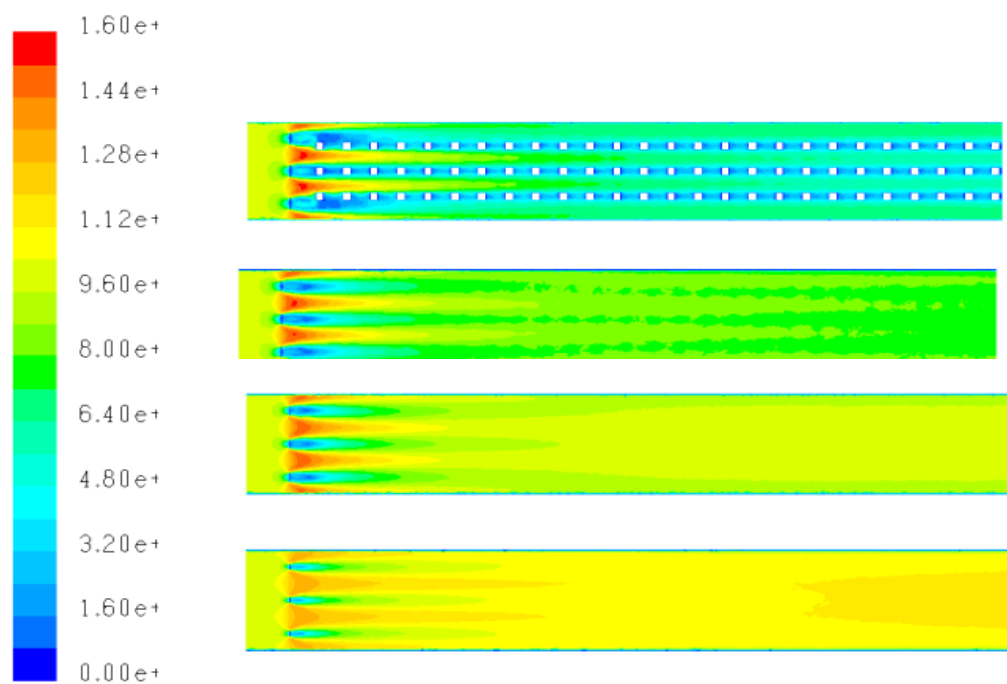


Figura 63. Configuración 10: Planos horizontales

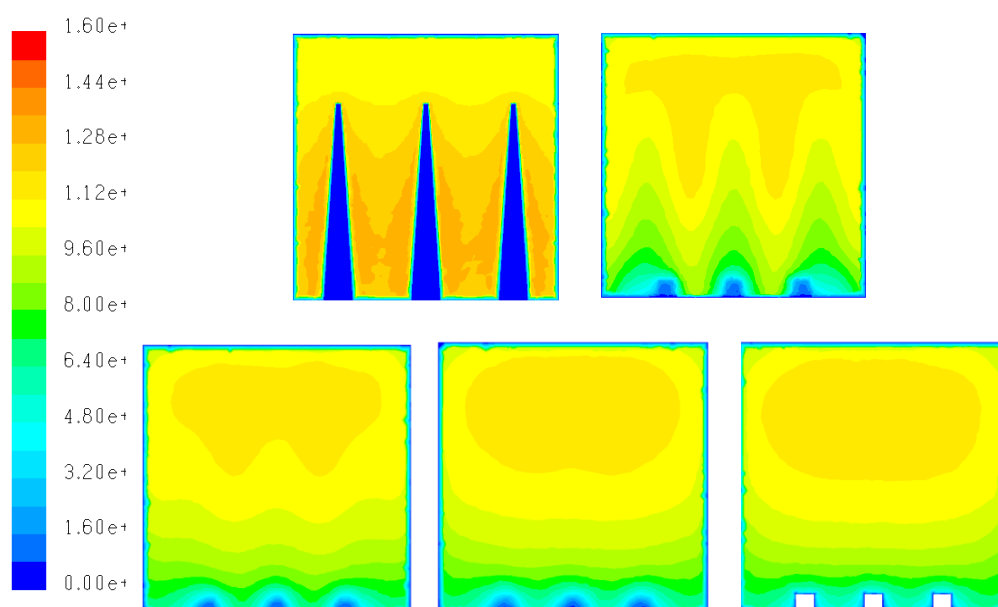
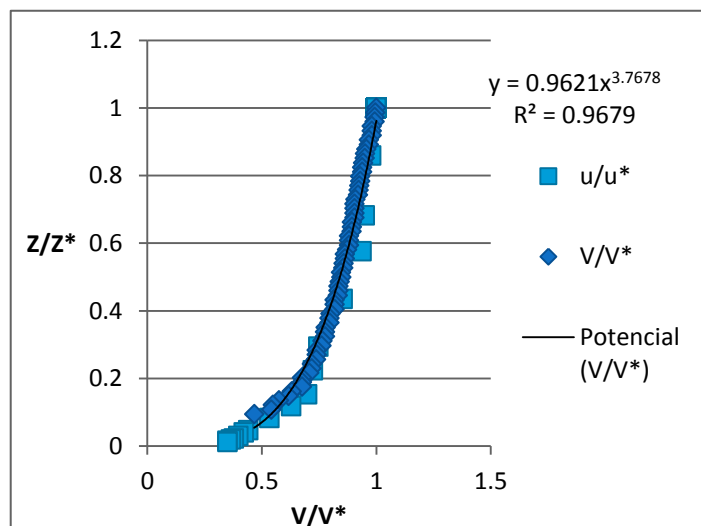


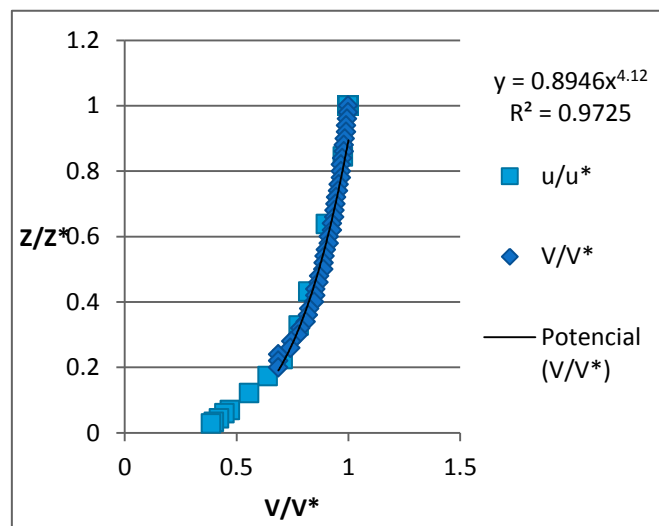
Figura 64. Configuración 10: Secciones transversales

Las gráficas reflejan valores muy similares entre ambos casos y con la línea potencial. Si nos fijamos en los valores de alpha de la tabla 18, se aprecia que todos los valores están dentro del mismo rango de valores que el eurocódigo cataloga como tipo de terreno IV.

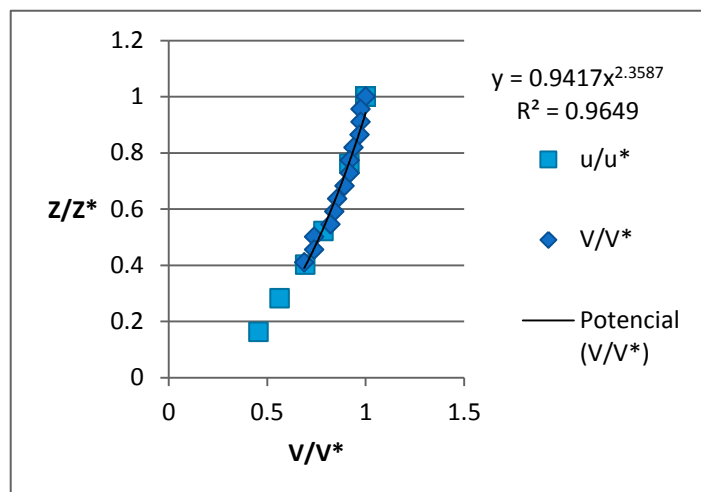
Linea\_0.65



Linea\_1.15



Linea\_1.65



Linea\_2.15

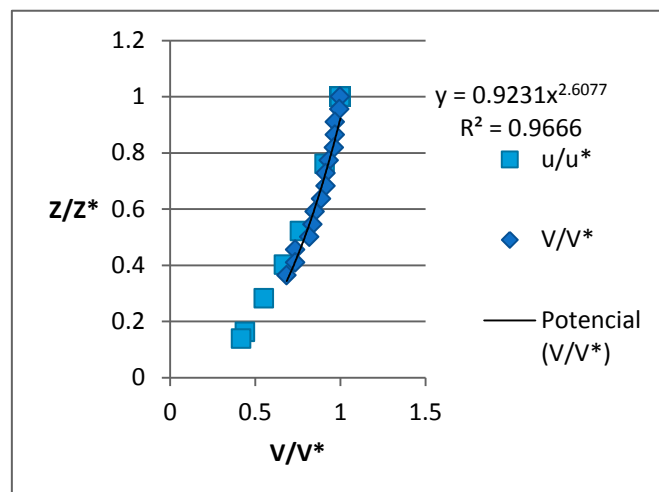


Figura 65. Configuración 10: Comparación de resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.26540687	0.24271845	0.42396235	0.38347969
Maqueta	0.25194	0.271407	0.351642	0.226588

Tabla 18. Configuración 10: Comparación de alpha

### 8.11 Configuración 11: $R_2 T_3$

Esta configuración se caracteriza por tener simulados los triángulos tipo III y la rugosidad que representa el terreno tipo III a escala 1:200. Si nos fijamos en el perfil de velocidades vemos que no sigue una línea continua, y estas discontinuidades se deben a que la malla utilizada para hacer los cálculos va aumentando proporcionalmente a  $z$ , por lo que en la parte superior es demasiado grande y serían necesarios más nodos para obtener toda la información. Aun así, como en los casos anteriores, sí que se aprecia la forma de la capa límite.

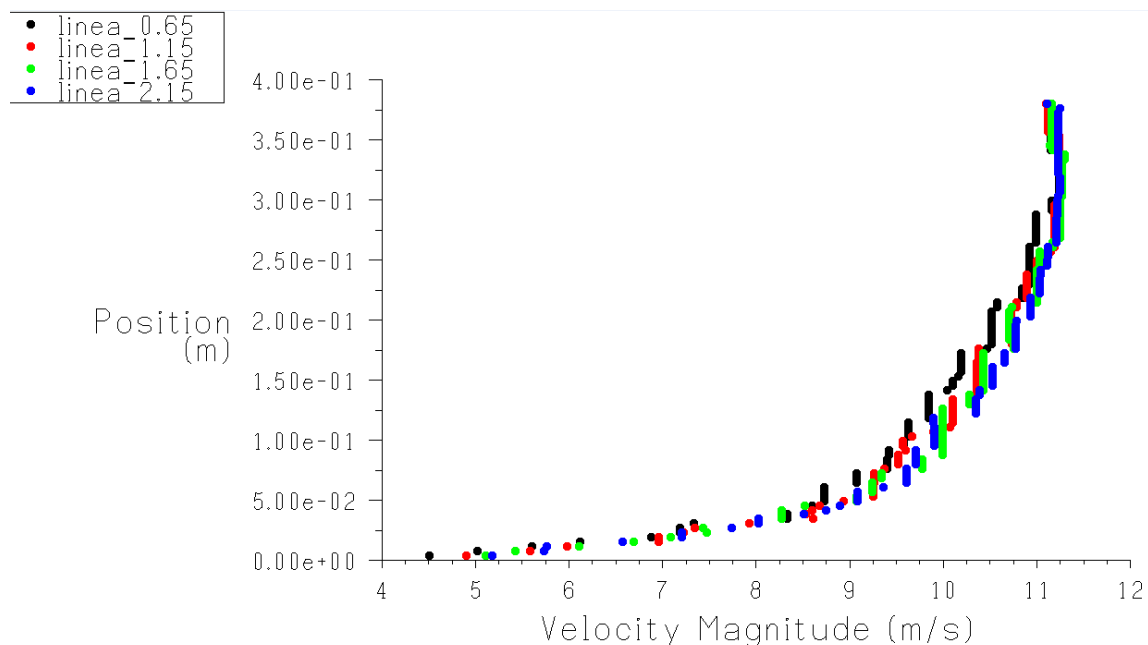


Figura 66. Configuración 11: Capas límites

Aunque en la grafica anterior no se aprecie, la velocidad cerca del techo también decrece hasta ser de valor cero y se puede comprobar tanto en la representación de los planos horizontales (ver *Figura 67*) como la de las secciones transversales (ver *Figura 68*).

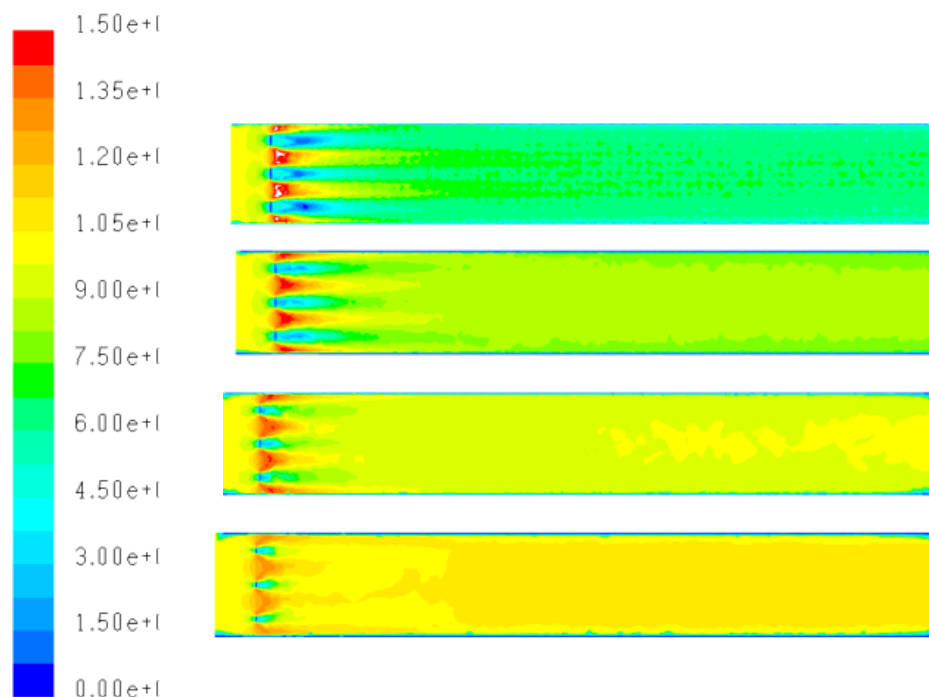


Figura 67. Configuración 11: Planos horizontales

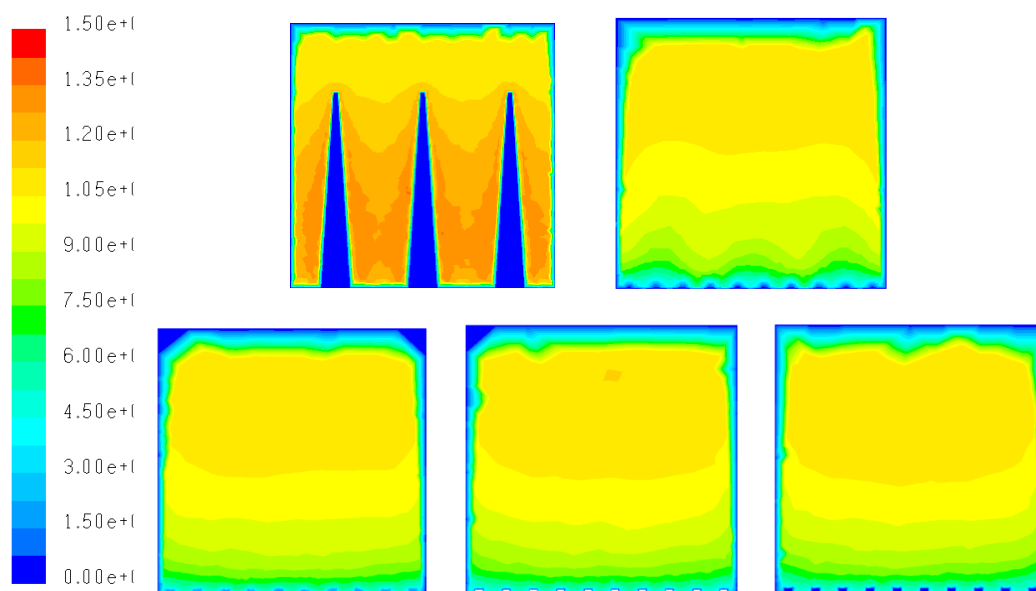
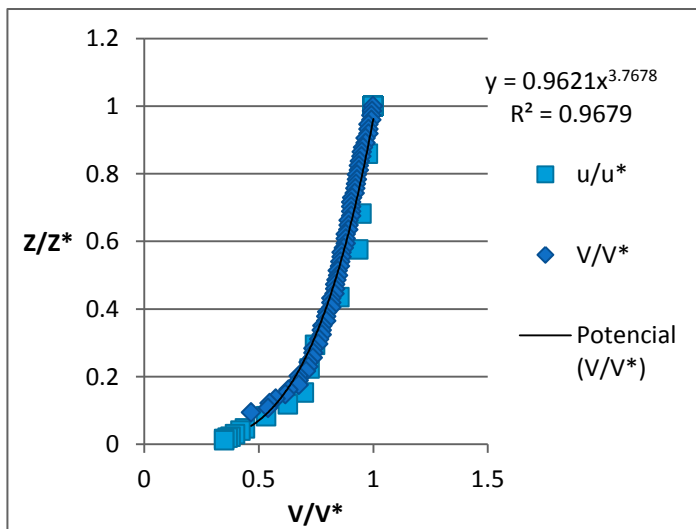


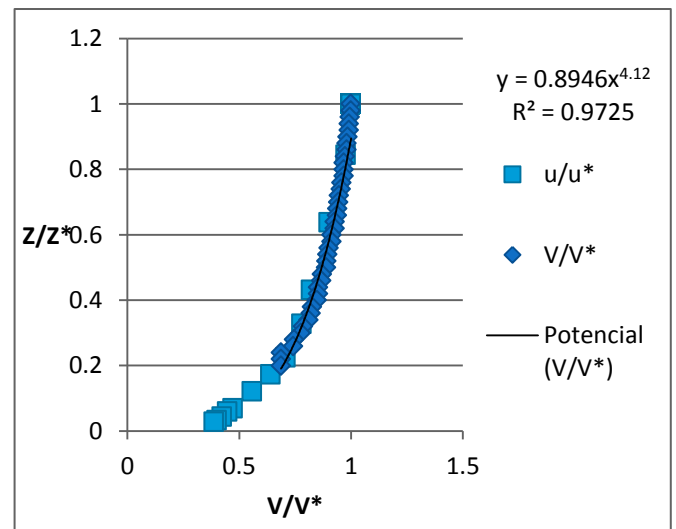
Figura 68. Configuración 11: Secciones transversales

Podemos comprobar que los cuatro perfiles de velocidades, uno de cada sección de control, coinciden con los resultados experimentales. Además, si comparamos los valores de  $\alpha$  obtenidos de la simulación de la maqueta vemos que solo uno de los valores coincide dentro del mismo rango que los de Fluent. Por otro lado, todos los valores obtenidos con el Fluent pertenecen al mismo rango que representa el tipo de terreno de categoría III.

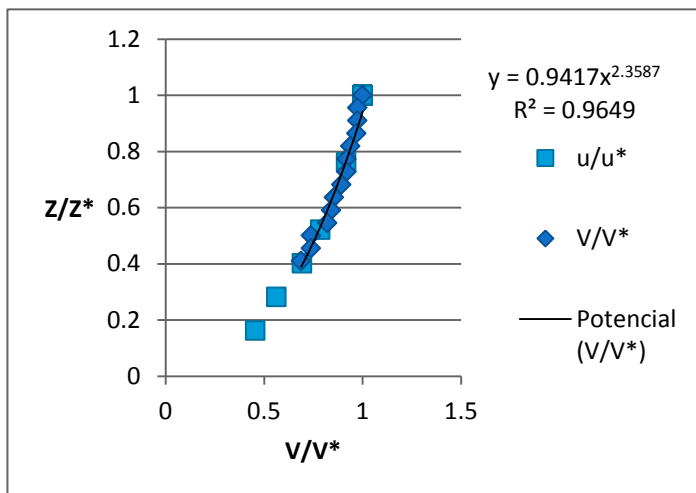
Linea\_0.65



Linea\_1.15



Linea\_1.65



Linea\_2.15

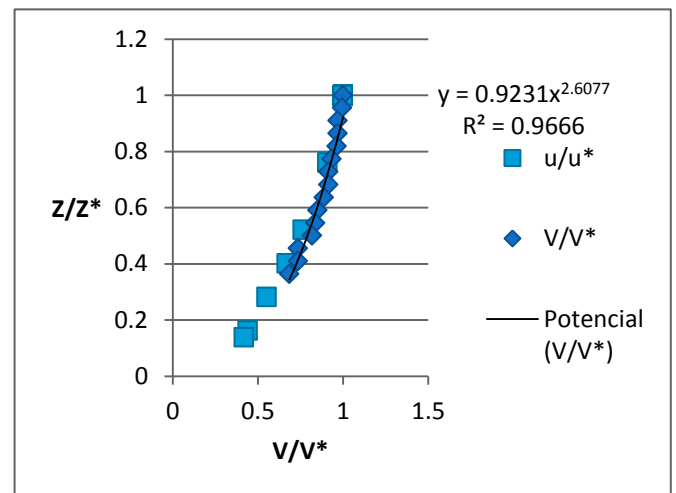


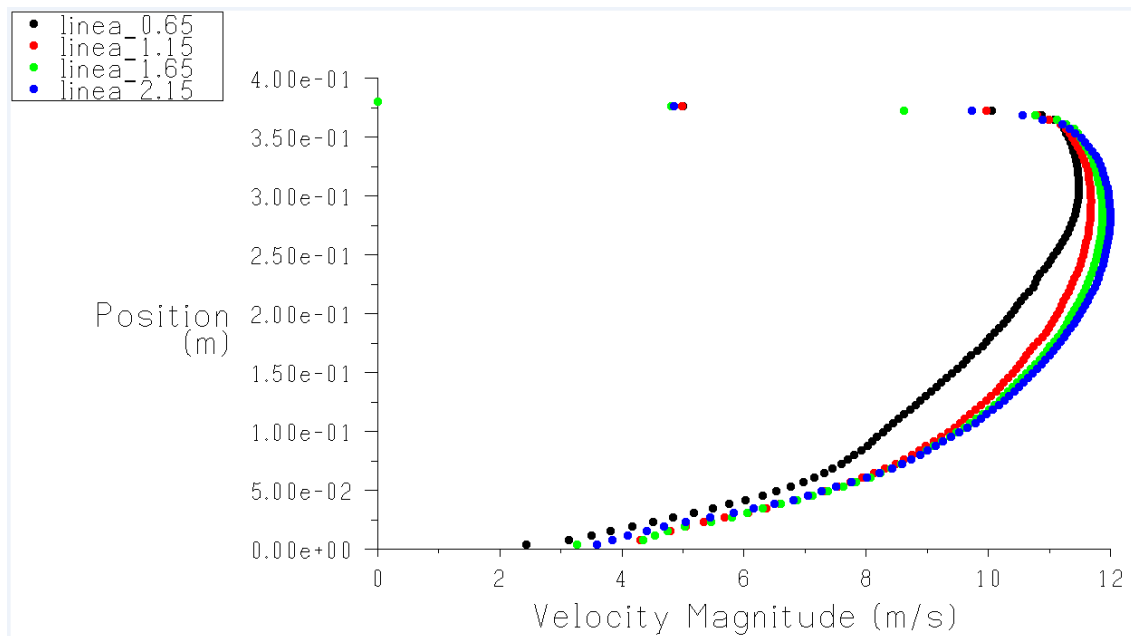
Figura 69. Configuración 11: Comparación de resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.20186116	0.19824356	0.23152436	0.23519451
Maqueta	0.208481	0.254207	0.2976	0.325203

Tabla 19. Configuración 11: Comparación de alpha

## 8.12 Configuración 12: $R_3 T_4$

Esta configuración combina la rugosidad representativa del terreno de categoría IV a escala 1:50, con una aguja de tipo IV. Como en todos los casos, la capa límite se desarrolla a lo largo del túnel como se puede ver en la siguiente gráfica.





A continuación podemos ver las representaciones de velocidad en la cámara de ensayos y ver como varía ésta a lo largo del plano horizontal y a lo largo del plano vertical.

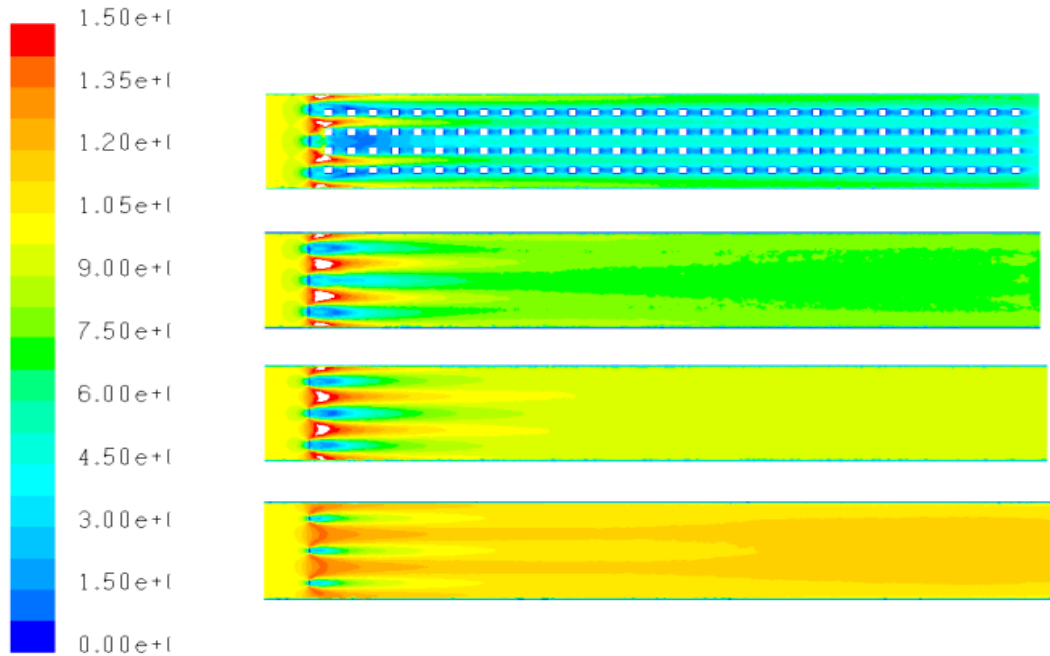


Figura 71. Configuración 12: Planos horizontales

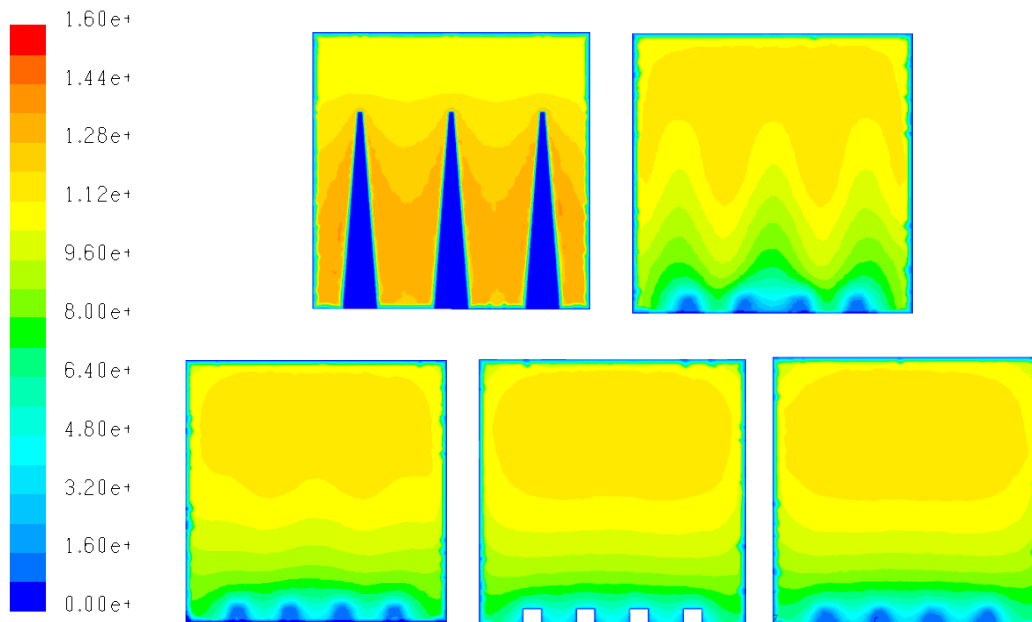


Figura 72. Configuración 12: Planos transversales

Para este ensayo no disponemos de los resultados experimentales de la primera sección de control (línea\_0.65) por lo que no se puede comparar. Las demás gráficas vemos que tienen los valores sobrepuestos por lo que son muy similares, y si miramos las alphas vemos que todas sin excepción pertenecen al mismo rango y representan el terreno de categoría IV.

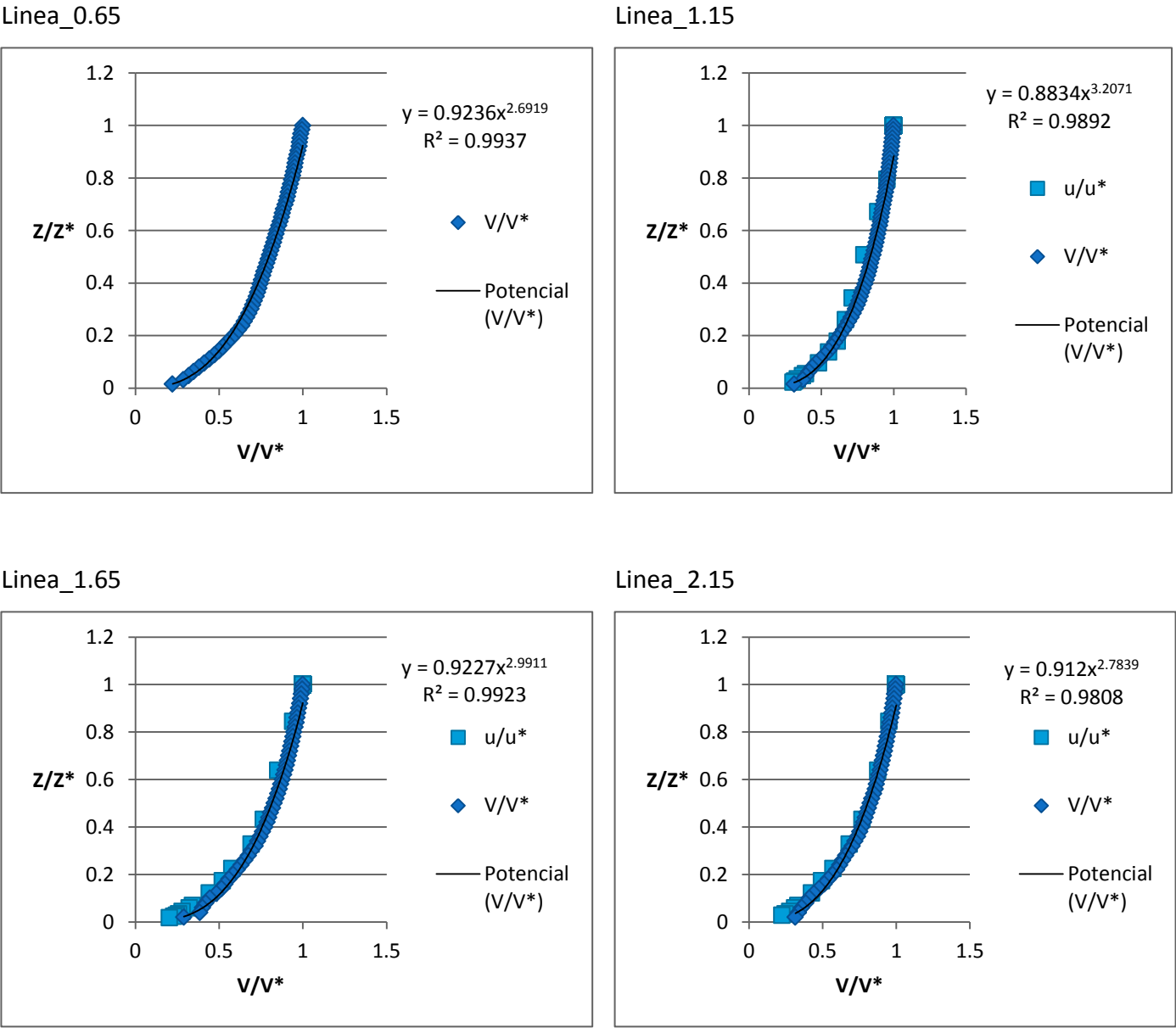


Figura 73. Configuración 12: Comparación resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.37148482	0.31180818	0.33432516	0.3592083
Maqueta		0.316726	0.39482	0.409517

Tabla 20. Configuración 12: Comparación de alpha

### 8.13 Configuración 13: $R_4 T_4$

Esta configuración es una combinación de agujas tipo IV con la rugosidad representativa de terrenos de categoría IV a escala 1:2000. En este caso vemos que la capa límite se desarrolla muy rápido ya que entre la primera sección de control y la última no hay demasiada diferencia.

También podemos observar como el techo provoca que la velocidad descienda de forma continua hasta ser cero.

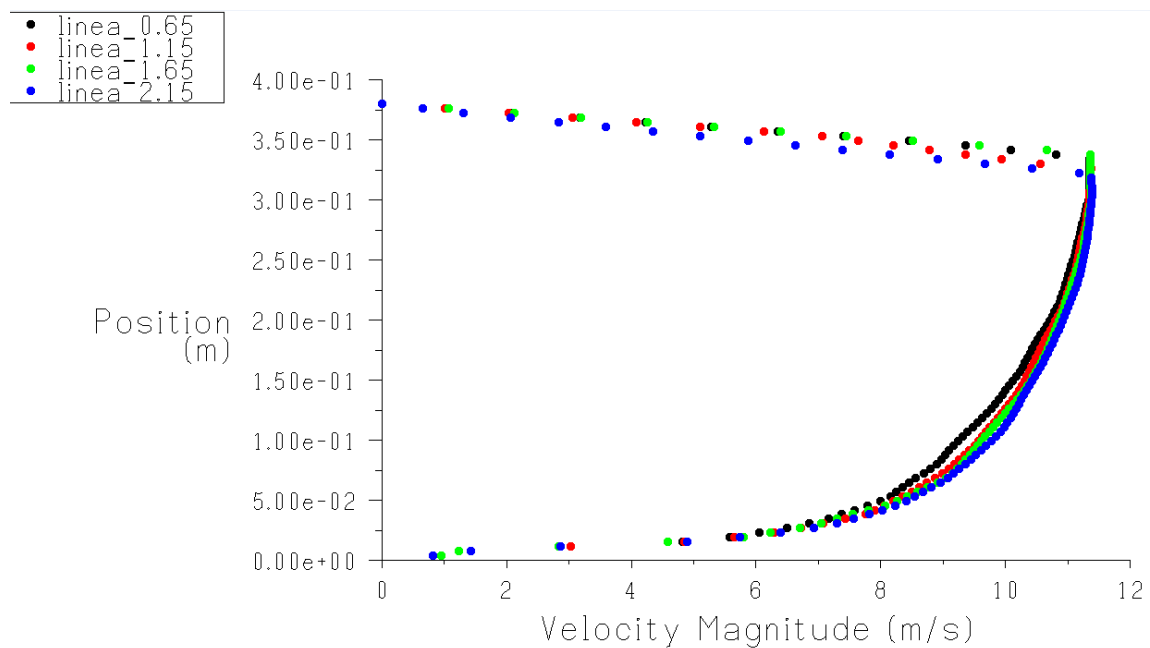


Figura 74. Configuración 13: Capas límites

Una vez más comprobamos que las capas de flujo inferiores van a menos velocidad debido a la rugosidad del suelo, hecho que también se debe a las agujas ya que son más anchas por la base que en la cima. Por ello, el flujo va más rápido por la parte superior de la cámara de ensayos.

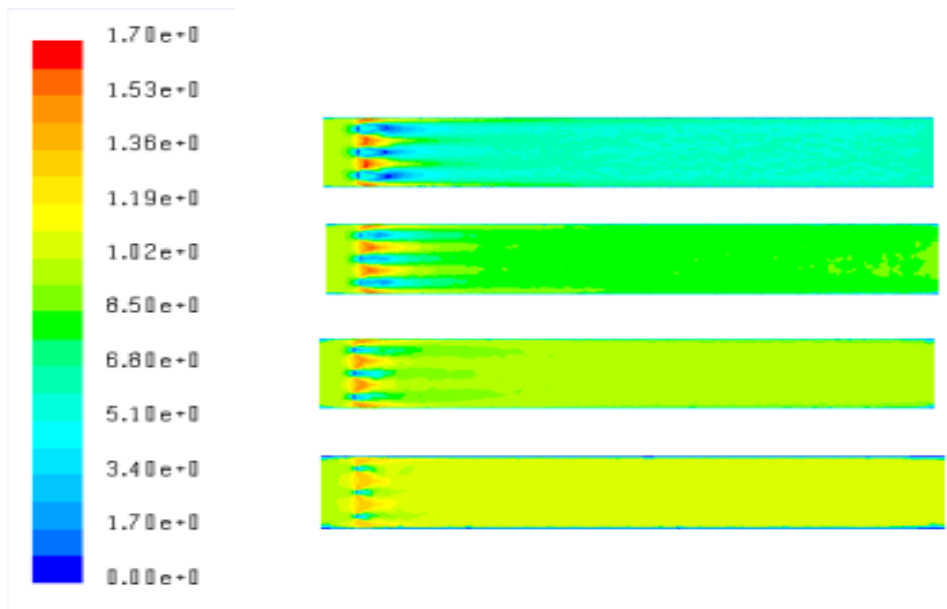


Figura 75. Configuración 13: Planos horizontales

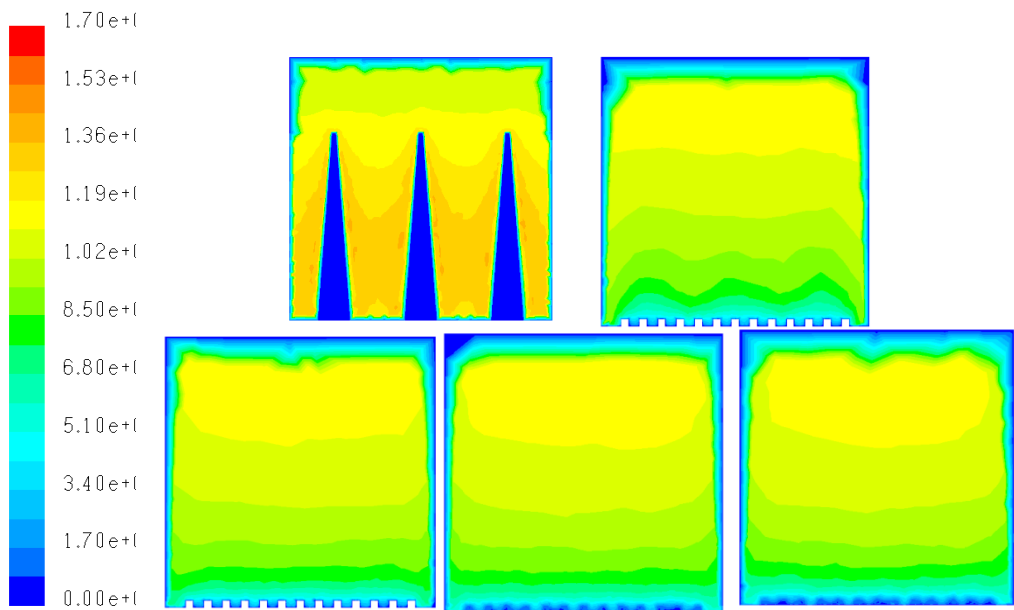


Figura 76. Configuración 13: Secciones transversales

Para este caso tampoco contamos con los resultados empíricos de la primera sección de control, por lo que no se puede comparar, aunque si que se ha adimensionado a la misma altura que la sección 1.15. Comparando el valor de las alphas vemos que tienen diferencia de décimas, pero aun así todos se encuentran dentro del mismo rango que representa el terreno de tipo IV.

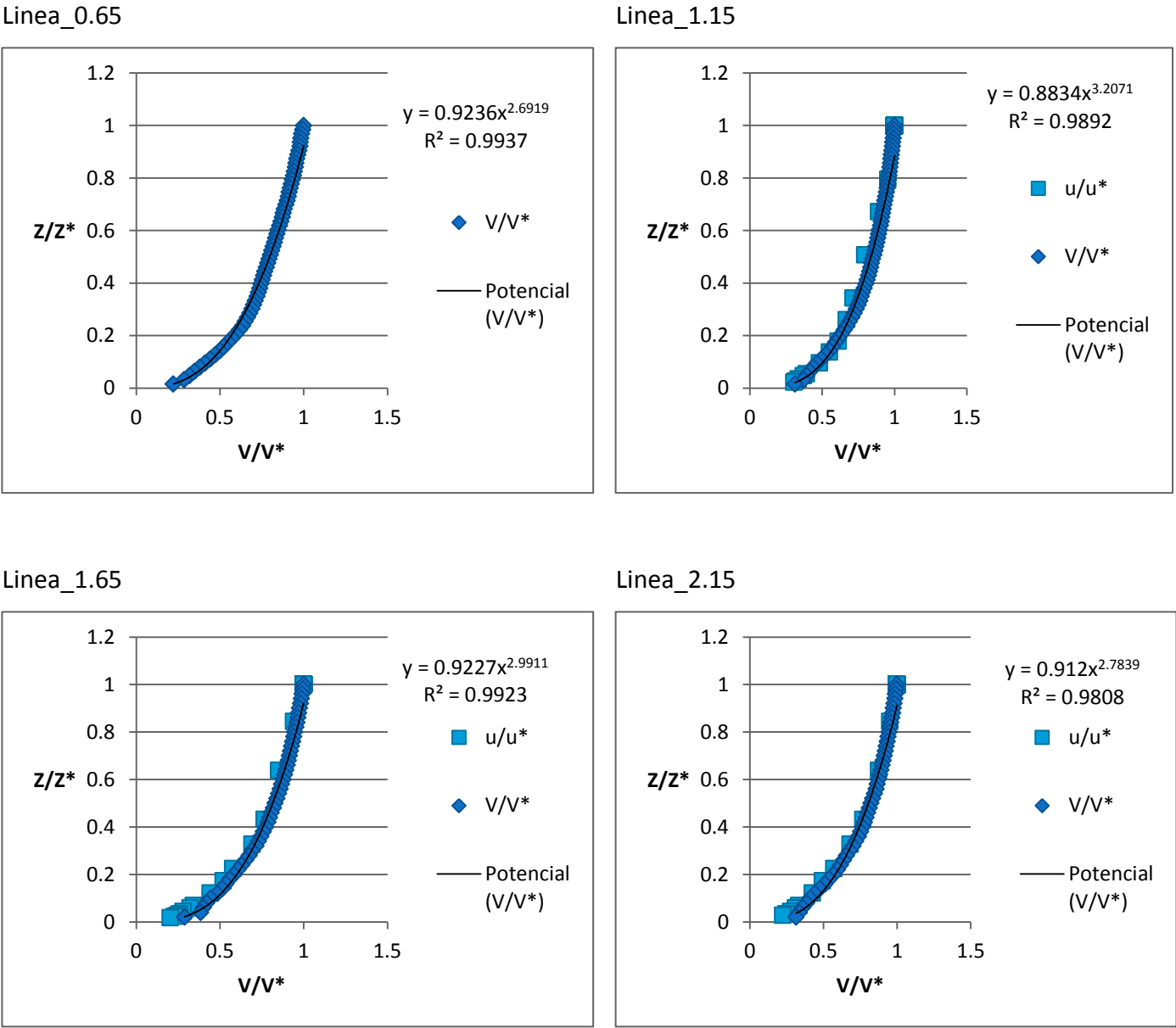


Figura 77. Configuración 13: Comparación de resultados

$\alpha$	Linea_0.65	Linea_1.15	Linea_1.65	Linea_2.15
Fluent	0.24371816	0.253614	0.25122472	0.27026297
Maqueta	-	0.30512	0.351062	0.356087

Tabla 21. Configuración 13: Comparación de aplha

## 8.14 Conclusiones

Como hemos visto a lo largo de este punto, el flujo proveniente del ventilador es uniforme y paralelo, y si no hay ningún obstáculo seguirá la trayectoria y la distribución inicial a lo largo del túnel con pequeñas disminuciones de velocidad en las zonas de pared. Al introducir un obstáculo, ya sea rugosidad superficial o una aguja, el flujo tiende a desplazarse a más velocidad por la parte media superior de la sección ya que al reducir el área hábil para moverse incrementa la velocidad por los sitios que presentan menos resistencia.

Pero a parte de la dinámica del flujo, también se ha comparado el exponente de rugosidad  $\alpha$ . El Eurocódigo define cuatro categorías de terreno según este valor, y con los datos obtenidos, se ha ido analizando caso por caso. En la tabla siguiente vemos en qué rango se encuentra el valor de las  $\alpha$  tanto de las medidas experimentales como las de Fluent.

Configuración	Ensayo	Categoría de terreno
1 (sin nada)	Fluent	CAT I – CAT IV
	Maqueta	CAT I – CAT IV
6 ( $T_1$ )	Fluent	CAT I
	Maqueta	CAT I
7 ( $T_2$ )	Fluent	CAT I
	Maqueta	CAT I
10 ( $R_1 T_3$ )	Fluent	CAT IV
	Maqueta	CAT IV
11 ( $R_2 T_3$ )	Fluent	CAT III
	Maqueta	CAT IV
12 ( $R_3 T_4$ )	Fluent	CAT IV
	Maqueta	CAT IV
13 ( $R_4 T_4$ )	Fluent	CAT IV
	Maqueta	CAT IV

Tabla 22. Resultados de todas las comparaciones de  $\alpha$

En la tabla se refleja que todos los valores de  $\alpha$  pertenecientes a un mismo ensayo, con excepción de la configuración 11, representan el mismo tipo de terreno, es decir, que las  $\alpha$  se encuentran en el mismo rango.

Como hemos visto al analizar la configuración 3 donde se estudia la rugosidad  $R_2$ , la malla de dicha configuración tenía déficit de información por la parte superior. Esto puede ser la causa de que la configuración 11, las  $\alpha$  obtenidas con el Fluent no representen la misma categoría de terreno que las obtenidas experimentalmente de la maqueta.

Otro hecho, es que las configuraciones 10 y 11 están diseñadas para representar el terreno de categoría III, pero realmente están representando el terreno de categoría IV. Como aún se están realizando ensayos, puede que no se haya contrastado los resultados de la maqueta con la realidad, pero estas comparaciones no conciernen a éste proyecto.

Así pues, podemos concluir que a pesar de que los valores de  $\alpha$  pueden tener diferencias de decimas, pertenecen al mismo rango de valores para un mismo tipo de terreno. Las diferencias de la  $\alpha$  pueden deberse a que las alturas de adimensionamiento no eran exactamente las mismas, pero aun así podemos decir que si se puede simular una maqueta con un programa de CFD y obtener resultados parecidos a los obtenidos a la maqueta.

9

## CONCLUSIÓN



## 9. CONCLUSIÓN

Desde que se pusieron en práctica los primeros ensayos en túneles aerodinámicos para ver como afectaba el viento a la maqueta de una aeronave, se han ido perfeccionando hasta el punto de expandir su objetivo y aplicarse en campos no aeronáuticos. La gran importancia de certificar la seguridad de aeronaves, edificaciones, o simplemente de mejorar la aerodinámica de un ciclista, contribuyen a afianzar su necesidad antes de lanzar un producto o construir un puente. Por ello, a parte de realizar estudios en los túneles aerodinámicos, éstos también son estudiados para conseguir el máximo de rentabilidad al menor coste posible.

En este proyecto se realiza una maqueta a escala 1:5 del túnel aerodinámico ACLA-16 situado en el campus de Montegancedo, perteneciente al Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM). Este túnel realiza diferentes ensayos, pero el que se ha estudiado aquí son los ensayos de capa límite atmosférica que sirven para ver como varía el aire según los distintos tipos de terreno, y ver como afectan a la estructura civil.

Por otro lado, la tecnología informática también se ha desarrollado de tal manera que hay programas de análisis de la dinámica computacional de flujos (CFD) que pueden simular un túnel aerodinámico e introducirle las variables pertinentes para representar el ensayo y obtener más datos.

Así es como se determinó diseñar y fabricar la maqueta del ACLA-16 para obtener resultados y luego compararlos con los resultados de la simulación de dicha maqueta realizada con el programa Fluent.

Para el diseño del túnel aerodinámico se ha valorado que fuese un modelo sencillo, por lo que solo se ha tenido en cuenta la cámara de ensayos, la cual tiene que ser considerablemente más larga que la sección transversal para que la capa límite atmosférica tenga tiempo de desarrollarse. Se decidió fabricar la cámara de ensayos de sección cuadrada de 38 x 38 cm y una longitud de 265 cm, hecha con contrachapado.

La planta motriz se ha escogido en base a dos requisitos básicos; que proporcionara una velocidad máxima de 20 m/s y que fuera capaz de salvar las pérdidas de carga que se producen a lo largo del túnel. Por ello se acabó optando por un ventilador DHAD 450-5 de Airtècnics que trabaja en trifásico, con potencia de 2'1 kW e intensidad nominal de 3'65 A.

Esta selección condicionó la elección de los elementos electrónicos. De entre todas las empresas distribuidoras se ha optado por adquirir todos los elementos de la misma para evitar problemas de incompatibilidades. Siguiendo con la filosofía de la sencillez, el diseño del sistema eléctrico se ha basado en dos circuitos, uno de maniobra para poder recoger los datos con la instrumentación y el propio portátil, y un circuito de potencia para poder variar la velocidad del flujo mediante un variador de frecuencia. Además, como todo circuito eléctrico, éste cuenta con tres tipos de interruptores de protección, teniendo los valores de corte más conservadores los que pertenecen al circuito de maniobra, ya que es el que utilizan las personas. Finalmente se escogió un anemómetro de hilo caliente para realizar las mediciones de variación de velocidad.

Una vez fabricada la maqueta se ha diseñado, mediante cubos, las rugosidades representativas de los terrenos tipo III y IV (según el Eurocódigo) con escalas de 1:50 y 1:200 cada uno. Además dichas configuraciones se han combinado con generadores de turbulencia para representar más fielmente la perturbación del terreno.

Por otro lado se ha simulado con el programa de preproceso Gambit cada uno de los casos a estudiar para exportar la malla al programa de CFD ANYLS Fluent. Para realizar los cálculos con ambos programas es necesario tener un ordenador con mucha CPU y memoria RAM para que los pueda procesar sin dificultad. En nuestro caso tuvimos que degradar un poco la malla para poder realizar los cálculos. Aun así, los perfiles de velocidades de capa límite obtenidos con el programa Fluent concuerdan con los obtenidos experimentalmente en la maqueta.

Por lo que se concluye, que si se pueden realizar estudios de una maqueta de un túnel real utilizando el programa Fluent y aplicando un modelo de turbulencia K-ε, para obtener resultados, lo cual es una forma más eficaz, sencilla y más barata de llevar a cabo dichos ensayos.

**10**

## **REFERENCIAS**

## 10. REFERENCIAS

- [1] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) *George Cayley*. Consultado: Abril 2012
- [2] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) *Túnel de viento*. Consultado: Abril 2012
- [3] Meseguer, J., Sanz, Á. *Aerodinámica básica*. Garceta. (2011)
- [4] [www.mashpedia.es](http://www.mashpedia.es) *Túnel de viento*. Consultado: Abril 2012
- [5] Kulkarni, V., Sahoo, N., Chavan, S. *Simulation of honeycomb-screen combinations for turbulence management in a subsonic wind tunnel*. Elseiver (2011)
- [6] Días, L. *Estudio de propulsores para aplicación en túneles de viento*. EETAC. (2005)
- [7] [www.f1technical.net](http://www.f1technical.net) *Túnel aerodinámico*
- [8] Sánchez, J. *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. Escuela de Ingeniería de Sevilla. (2004)
- [9] Meseguer, J., Sanz, Á., Perales, J., Pindado, S. *Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil*.
- [10] Cañizares, M. *Aplicación DI-Instalación para ensayos aerodinámicos*. ETSI Aeronáuticos (2010)
- [11] Meseguer, J. *Túneles Aerodinámicos*. Madrimasd (2005). Consultado: Abril 2012
- [12] [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) *Wind tunnels*. Consultado: Abril 2012
- [13] Meseguer, J., Sanz, Á., Franchini, S., Martínez, S., Pindado, S., Vega, E. *El túnel aerodinámico ACLA – 16 de la Universidad Politécnica de Madrid*. Num. 369 (Diciembre 2009 – Enero 20120)
- [14] Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A. *Low-speed tunnel testing*. John Wiley & Soncs, Inc. (1999)
- [15] [www.fcen.uba.ar](http://www.fcen.uba.ar) *Características de la capa límite atmsoférica*. FCEN. Consulta: Mayo 2012
- [16] Wah, L., Liang, L. *Atmospheric boundary layer wind tunnel design*. Adelaide SA 5005, Australia
- [17] UPME. *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión*. Documento ANC-0603-18-01 (2003)

- [18] Lazcano, M.F., Tagüe, C. *estudio de las alturas características de la capa límite atmosférica en situaciones estables obtenidas con tres métodos distintos.*
- [19] [www.metnet.org](http://www.metnet.org) *Fenómenos de microescala: capa límite planetaria.* Consulta: Mayo 2012
- [20] Stull, R.B. *An introduction to boundary layer meteorology.* Kluwer Academic Publishers (1988)
- [21] Bortoli, M., Natalini, B., Paluch, M. *Similaciones de espesor total de capa límite atmosférica neutralmente estable por los métodos de Counihan y Standen.* Universidad Nacional del Nordeste, Argentina
- [22] Bañuelos, F., Camacho, C., Serrano, J., Muciño, D. *Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento.* Instituto y Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México
- [23] Aubrun, S. *Wind tunnel modelling of atmospheric boundary layer.* Université d'Orléans, France
- [24] *Eurocódigo 1, Bases de proyecto y acciones en estructuras, Parte 2 – 4: Acciones en estructuras. Acciones del viento.* UNE-ENV 1991-2-4, AENOR (1998)
- [25] *Turbulencia.* Área de mecánica de fluidos, Universidad de Oviedo
- [26] González, F. *Modelado del viento para simulaciones computarizadas de sistemas de potencia.* Reporte (Diciembre 2007)
- [27] [www.chiblosa.com.ar](http://www.chiblosa.com.ar) *Clasificación de los ventiladores industriales.* Chicago Blower SA, Argentina. Consulta: Mayo 2012
- [28] Vega, V. *Simulación CFD de la entrada de aire de un motor a reacción.* EETAC (Julio 2011)

**11**

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. ANÁLISIS NUMÉRICO

Los programas de análisis computacional de fluidos, más conocidos como CFD por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*, pertenecen a un campo de la mecánica de fluidos que se encarga de resolver problemas de fluidos mediante métodos numéricos y algoritmos. Para realizar dichos cálculos, los CFD se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen un fluido en cualquiera de sus fases. La resolución analítica de estas ecuaciones no es posible, salvo casos muy concretos, por lo que normalmente se recurre a la aproximación numérica de la solución, que es lo que obtenemos con los programas de CFD.

Los cálculos sirven para simular la interacción de los fluidos con superficies de cualquier tipo, o simplemente, para ver cómo se desarrollan en un sitio concreto. Por ello, los estudios realizados con CFD juntamente con los ensayos en los túneles de viento, son muy importantes para contrastar los resultados y ver, por ejemplo, si un avioneta será apta para volar a tamaño real, o si un edificio será capaz de aguantar la cizalladura del viento. Al ser cálculos complejos, se necesitan ordenadores con gran capacidad de procesamiento para obtener mejores soluciones en el menor tiempo posible.

Todos los programas de CFD siguen el mismo procedimiento para realizar los cálculos [28]:

- Preproceso:
  - Definir la geometría del modelo, creando líneas, áreas o volúmenes.
  - Generar la malla sobre el modelo para realizar una aproximación discreta de él en base a puntos o nodos. Estos nodos se conectan para formar elementos finitos que juntos forman el volumen del modelo simulado.
  - Definir las condiciones iniciales del problema, haciendo especial hincapié en las propiedades del flujo y las de los obstáculos o paredes que lo limitan.
- Proceso: Se aplican condiciones a los elementos a simular, como por ejemplo, las fuerzas en las que está sometido, niveles de rugosidad, etc. Luego se inicia

el cálculo de la simulación que se basa en ir resolviendo las ecuaciones mediante la iteración de las variables, hasta que éstas llegan a converger, es decir, hasta que las variables sean estables.

- Postprocesador: se dedica a visualizar y analizar los resultados del ensayo.

Para realizar el ensayo de capa límite del túnel aerodinámico se ha seguido el procedimiento anterior. Se ha empleado el programa de preprocesado Gambit, y luego para realizar la simulación y visualizar los resultados se ha utilizado el programa Fluent 6.0. A continuación se detalla un poco más el proceso que se ha llevado a cabo en cada programa.

### Preproceso: Gambit

---

La geometría del túnel diseñada, es representada mediante Gambit para poder mallarla y luego introducirla al programa Fluent para realizar los cálculos pertinentes. Por ello, primero se han dibujado las aristas (amarillo), luego se han creado las superficies (azul) y finalmente se crea el volumen (verde) (ver *Figura 78*).

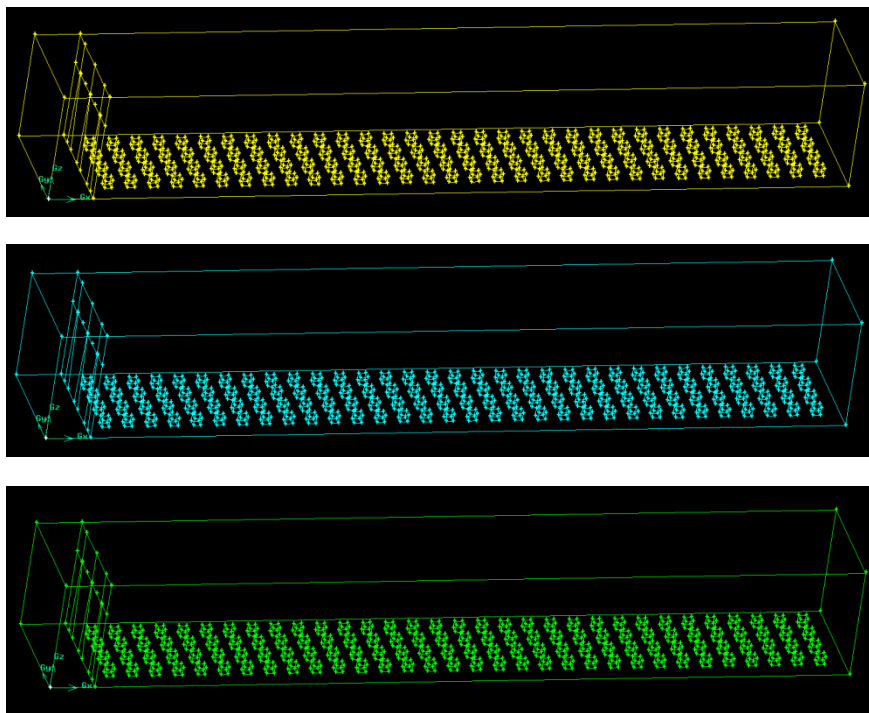


Figura 78. Gambit: aristas, superficies y volúmenes



El segundo paso es discretizar el modelo con una malla suficientemente pequeña para poder obtener la información necesaria, pero teniendo en cuenta la capacidad del ordenador ya que si la malla es demasiado pequeña el procesador puede que no sea suficientemente potente para realizar los cálculos, o que se tarden semanas en obtenerlos. Por ello se ha llegado a un compromiso, y la zona del suelo se ha mallado de forma más exhaustiva ya que es la zona que nos interesa estudiar, y a medida que la malla se acerca al techo se va agrandando (ver *Figura 79*).

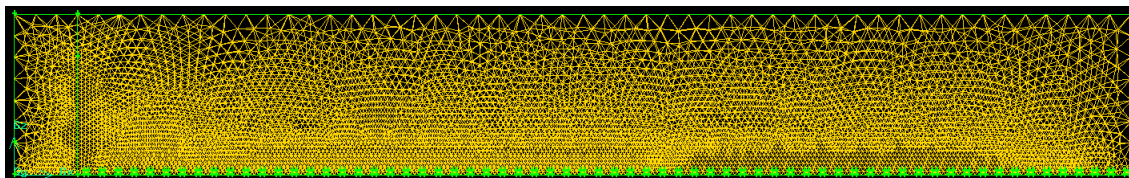


Figura 79. Vista XZ de la malla utilizada

Además también se ha tenido en cuenta que la malla de los bloques de rugosidad y la malla cerca de la punta del triángulo fueran lo más precisas posible para obtener toda la información posible.

Por último, se han introducido las características de los elementos ya que es necesario para que luego el Fluent sepa que es cada cosa. La pared de entrada se ha definido como “velocity\_inlet”, la pared de salida se ha definido como “outlet\_pressure” y el resto de paredes, los cubos y los triángulos se han definido como “Wall”.

Una vez introducidos todos los datos, se exporta la malla, la cual ya estará preparada para la simulación.

El programa Fluent es una herramienta de dinámica de fluidos computacional de la empresa ANSYS. Para poder solucionar el problema es necesario tener una malla realizada por un programa de postproceso, en nuestro caso el programa Gambit.

Después de cargar la malla al programa y comprobar que no hay ningún error, se tiene que definir el modelo del flujo, ya sea laminar o turbulento. En nuestro caso, como queremos estudiar la capa límite atmosférica optaremos por un modelo turbulento, el estándar  $k - \epsilon$ . Este modelo se caracteriza por ser robusto, económico y con precisiones razonables, pero en su contra no obtiene buenos resultados para flujos complejos con fuertes gradientes de presión (no es nuestro caso). Así que éste modelo cubre las necesidades del problema, y se le tiene que definir la intensidad de turbulencia y la escala que serán del 3% y el 0.01 metros, respectivamente.

El programa resuelve numéricamente las ecuaciones mediante un paso iterativo, hasta que los residuos alcanzan un valor estable, es decir, hasta que las variables convergen.

Pero la solución no se puede dar por válida sin comprobar el parámetro Wall  $Y^+$  para la turbulencia. Dicho valor debe ser inferior a 300. En caso de no ser así, se tiene que refinar la malla y volver a calcular las iteraciones para obtener la nueva solución.

Luego sólo queda ver los resultados en la pantalla y analizarlos tal y como se ha hecho en éste trabajo.

## ANEXO 2. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA

Todo sistema fluido tiene asociadas pérdidas de carga que son las pérdidas de presión que se producen como consecuencia de sobreponerse a las fuerzas de resistencia hidráulica para que el flujo pueda circular. Este proceso genera calor, que a su vez es absorbido por el fluido al expandirse. Esta pérdida de presión tiene que ser compensada con el generador de flujo, por los ventiladores, por ello saber las pérdidas de carga de un túnel es un parámetro importante para elegir bien la planta motriz.

Se pueden diferenciar dos grandes grupos de pérdidas de carga dependiendo de su origen:

- Pérdidas de carga continuas: energía disipada por la viscosidad de las partículas de fluido entre sí o entre dos capas de flujo adyacentes, al moverse a velocidades distintas. También se debe a la fricción con las paredes que lo contiene, lo cual depende de la rugosidad del conducto.
- Pérdidas de carga locales: energía disipada en secciones concretas debido a características propias de dicha sección. Por ejemplo, puede ser una sección con un cambio brusco de geometría, que haya una zona con desprendimiento de capa límite y que se formen torbellinos, o debido a obstáculos puntuales en el conducto.

En nuestro caso, al ser una sección cuadrada constante y de gran longitud, las pérdidas de carga que más afectan son las continuas y se deben a la fricción con las paredes. Para simplificar el cálculo de dichas pérdidas aplicamos el principio de superposición, según el cuál podemos calcular las pérdidas de cada parte del túnel y luego sumarlas para obtener el valor de pérdida de carga total. Como sólo tenemos una cámara de ensayos, analizaremos cada pared por separado y luego sumaremos los valores obtenidos.

Se calculan mediante la ecuación de Darcy - Weisbach (expresión 11.1):

$$\Delta p_{fr} = f \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2} \quad (11.1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del flujo,  $v_0$  la velocidad del flujo requerida en la cámara de ensayos y  $f$  es el coeficiente de resistencia fluida, el cual se caracteriza por ser el cociente entre la presión total perdida y la presión dinámica, pero si consideramos que se encuentra en densidad constante, podemos definirlo de una manera mucho mas sencilla que nos simplificará los cálculos (expresión 11.2).

$$f = \lambda \cdot \frac{l}{D_h} \quad (11.2)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{Área}_{sección}}{\text{Perímetro}_{sección}} \quad (11.3)$$

Donde  $l$  es la longitud de la sección,  $D_h$  el diámetro hidráulico de la sección (expresión 11.3) y  $\lambda$  es el factor de pérdida de carga por fricción de la unidad de longitud relativa del tramo.

Este último factor,  $\lambda$ , tiene expresiones distintas dependiendo de si se trata de superficies lisas o superficies rugosas. Por ello, el coeficiente de resistencia fluida  $f$  será la suma del coeficiente de resistencia fluida en paredes lisas más el coeficiente de resistencia fluida en paredes rugosas. En nuestro caso, hay tres superficies de contrachapado que se consideran lisas, mientras que la base de la cámara de ensayos donde colocamos los elementos de rugosidad no. Por lo que  $f$  se calculara de la siguiente manera (expresión 11.4):

$$f = 0'75 \cdot f_{lisa} + 0'25 \cdot f_{rugosa} \quad (11.4)$$

- Factor  $\lambda$

- Paredes lisas

Considerando el flujo incompresible y con régimen turbulento, el factor  $\lambda$  sólo depende del parámetro adimensional de Reynolds y tiene la siguiente expresión 11.5:

$$\lambda_{lisa} = \frac{1}{(1'8 \log R_e - 1'64)^2} \quad (11.5)$$

- Paredes rugosas

En este caso,  $\lambda$  depende del número de Reynolds y de la rugosidad. Se puede dar el caso que la rugosidad de la superficie sea tan pequeña que se pueda considerar lisa. Por ello se calcula un valor límite de rugosidad ( $\sigma$ ) que depende del número de Reynolds (expresión 11.6):

$$\sigma_{\text{límite}} = 17'85 \cdot R_e^{-0'875} \quad (11.6)$$

Si la rugosidad de la superficie es inferior al límite se considerara lisa y si es mayor se considerara rugosa y se tendrá que aplicar la siguiente expresión 11.7:

$$\lambda_{\text{rugosa}} = \frac{1}{(a_1 + b_1 \log R_e \sqrt{\lambda} + c_1 \log \sigma)^2} \quad (11.7)$$

Donde los parámetros  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$  son coeficientes que se recogen en tablas y sus valores se escogen a partir del valor de  $R_e \sqrt{\lambda}$  (número de Reynolds y de la rugosidad de la superficie).

- Factor de corrección

Las expresiones del factor  $\lambda$  sirven para conductos de sección circular, por lo que se tendrá que aplicar un factor de corrección ( $k_{\text{rect}}$ ) para poder aplicarlo a una sección cuadrada.

Laminar regime (Re < 2000, curve 1)							
$\frac{b_0}{a_0}$	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$k_{non-c} = k_{rec}$	1.50	1.34	1.20	1.02	0.94	0.90	0.89
Turbulent regime (Re > 2000, curve 2)							
$k_{non-c} = k_{rec}$	1.10	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01	1.0

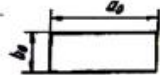


Tabla 23. Factor de corrección de  $\lambda$

Como vemos para secciones cuadradas y régimen turbulento ( $Re > 2000$ ) el factor de corrección es 1.

- Número de Reynolds

Como ya se explicó en el apartado 1.2.3 *Parámetros adimensionales*, éste es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza de inercia con la viscosidad del fluido. A parte de esta expresión, también lo podemos calcular como (expresión 11.8):

$$Re = \frac{v_0 \cdot D_h}{\gamma} \quad (11.8)$$

Donde  $\gamma$  tiene un valor de  $1'5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

- Rugosidad del túnel

Para obtener el valor de la rugosidad de las superficies se debe aplicar la siguiente expresión 11.9:

$$\sigma = \frac{z_0 \cdot N}{D_h} \quad (11.9)$$

Donde  $z_0$  es la correspondiente a la categoría de terreno que se esté representando y  $N$  es la escala de túnel.

Si aplicamos todo lo explicado en este apartado a nuestros casos obtendremos las pérdidas de carga en la cámara de ensayos. El caso de rugosidad más restrictivo y por consiguiente el que acarreará más pérdidas de presión es en el que tomamos un terreno de categoría IV a escala 1:200. Los datos necesarios para realizar los cálculos se encuentran resumidos en la tabla siguiente:

$P \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1'225
$v_0 \text{ (m/s)}$	10
$l \text{ (m)}$	2'65
$l_{\text{costado\_sección}} \text{ (m)}$	0'38

Tabla 24. Datos necesarios para el cálculo de pérdidas de carga

Los resultados que obtenemos después de realizar los cálculos son:

Resultados	Superficie rugosas	Superficie lisa
$D_h \text{ (m)}$	0'38	
$R_e$	$2'53 \cdot 10^5$	
$\sigma_{\text{límite}}$	$3'34 \cdot 10^{-4}$	-
$\sigma_{\text{túnel}}$	$5'26 \cdot 10^{-1}$	-
$a_1$	1'138	-
$b_1$	0	-
$c$	-2	-
$\lambda_{\text{circular}}$	$6'1 \cdot 10^{-1}$	$1'53 \cdot 10^{-2}$
$\lambda_{\text{rectangular}}$	$6'1 \cdot 10^{-1}$	$1'53 \cdot 10^{-2}$
$f$	4'1	$1'03 \cdot 10^{-1}$
$f_{\text{total}}$	1'10225	
$\Delta p_{\text{total}} \text{ (Pa)}$	67'51	

Tabla 25. Resultados de pérdida de carga

### ANEXO 3. FICHAS TÉCNICAS



# Anemómetro PCE-009



**Preciso medidor de aire para determinar la velocidad y temperatura del aire con cálculo del volumen de corriente (cantidad de flujo) e interfaz RS-232 para la transmisión de datos**

El medidor de aire convence por su buena calidad. Este medidor de aire combina la precisión con la versatilidad y con la posibilidad de transmitir de manera directa los datos de medición a un PC o a un portátil. Este medidor de aire forma parte del equipamiento básico de un profesional del sector de la ventilación para regular y controlar o para analizar los posibles errores durante la transmisión de los datos. También se utiliza en investigación y desarrollo institucionales. Su fino puntero de 8 mm de diámetro hace posible el uso de este medidor de aire en zonas en las que hay un escaso espacio de medición, por ejemplo en aletas de refrigeración. Cuando usted introduce una superficie de medición en el medidor de aire, éste calcula de manera adicional el volumen de corriente de aire en m<sup>3</sup>/min. De esta manera podrá controlar la capacidad de la ventilación.

El medidor de aire:

- Mide velocidad y temperatura de aire
- Calcula el caudal (tras introducir la sección transversal)
- Es muy útil para velocidades de aire reducidas
- Diferentes unidades de medición m/s, km/h, ft/min, knot, mile/h
- Cuenta con una gran pantalla LCD
- Tiene un sencillo manejo
- Muestra valores máximo y mínimo
- Tiene función de mantenimiento de datos para los valores máximo y mínimo
- Tiene una función de auto desconexión (desconexión para proteger la batería)
- Tiene una interfaz RS-232 para la transmisión directa de datos al PC (online)

## Especificaciones técnicas

Rangos de medición

- m/s 0,2 ... 20,0
- °C 0,0 ... 50,0 (sonda)

Valor calculado e indicado para el volumen de corriente de aire:

- m<sup>3</sup>/min (CCM) 0 ... 36.000

Resolución

- Velocidad de aire 0,1 m/s (también para el resto de unidades, hasta ft/min = 1,0)
- Temperatura de aire 0,1 °C
- Volumen de corriente de aire (CCM) 0,001 ... 1 m<sup>3</sup>/min (según el valor de medición)

Precisión	
- Velocidad de aire	± 1 % (del rango de medición) o ± 5 % del valor de medición correspondiente
- Temperatura de aire	± 0,8 °C
- Volumen de corriente de aire (CCM)	valor calculado
Cuota de medición	De 2 s a 9 horas
Memoria interna	De 16.000 valores
Termo sonda	- Termistor telescópico extraíble / sensor de hilo caliente - Longitud recogido de 280 mm - Longitud extendido de 940 mm - Diámetro máximo de 12 mm - Diámetro mínimo de 8 mm (en el puntero)
Interfaz	RS-232
Software / cable de datos RS 232	- Compatible con Win 95, 98, 2000, XP - Los datos pueden ser enviados a MS Excel
Indicador	Gran pantalla LCD de 58 x 34 mm
Condiciones ambientales	Aparato: 0 °C ... 40 °C / < 80 % H.r. Termo sonda: 0 °C ... 50 °C / < 80 % H.r.
Alimentación	4 pilas de 1,5 V o por medio de adaptador de red de 9 V (opcional)
Desconexión automática	A los 5 min (protege la batería)
Dimensiones del equipo	Aparato: 203 x 76 x 38 mm Termo sonda: 8 mm diámetro x 940 mm de Longitud máxima (recogido sólo 280 mm)
Carcasa	Plástico ABS
Peso	515 g
<b>Contenido del envío</b>	
1 x Medidor de aire PCE-009	
1 x Cable de interfaz RS-232	
1 x Software	
4 x Pilas	
1 x Maletín	
1 x Instrucciones de uso	